

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE INDUSTRIEL

PAR  
TAYEB HOUASNIA

PONDÉRATION DES TAUX DE DÉFAILLANCES DES ÉQUIPEMENTS  
QUI OPÈRENT DANS DES MILIEUX HOSTILES

Décembre 1999

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## RÉSUMÉ

Le calcul de la fiabilité prévisionnelle d'un équipement ou d'un système a pour but de déterminer si, cet équipement ou système sont capables, dans une période de temps précise, d'accomplir ses fonctions dans des conditions définies. Ces conditions peuvent, entre autres, être reliées directement à l'environnement dans lequel ce dernier est appelé à fonctionner.

Dans les centrales nucléaires, une enveloppe de qualification environnementale est définie pour garantir le bon fonctionnement de certains systèmes lors d'un accident majeur. Cette enveloppe est généralement composée de plusieurs paramètres (température, pression, humidité, vibration... Etc.). Les équipements qui font partie de ces systèmes sont considérés comme qualifiés si leur conception répond aux exigences de l'enveloppe et qu'ils ont subi des tests démontrant le maintien de leurs performances dans les conditions de l'accident majeur.

En général, la technique des essais accélérés est utilisée pour qualifier un équipement. Cette technique consiste à rechercher une loi d'évolution d'un mécanisme en fonction du temps et des contraintes. Les résultats obtenus sous fortes contraintes, permettent de confirmer son fonctionnement dans les conditions d'exploitation prévues. Cette technique s'applique bien aux composants et non aux systèmes puisque ces derniers sont généralement composés d'une multitude de composants. Le principe des essais accélérés est d'échanger le rôle du temps et des contraintes, c'est à dire d'obtenir la même évolution interne pour des couples (contraintes, temps) différents (temps plus court, contraintes plus fortes). Ces essais ne donnent pas toujours des résultats adéquats, la cause principale, est que le milieu dans lequel ces équipements fonctionnent n'est pas le même que celui dans le laboratoire. De plus, les conditions d'exploitation et les activités de maintenance sont

également très différentes et peuvent influencer significativement la qualification des équipements.

Il existe d'autres méthodes, basées sur des modèles théoriques, utilisées pour ajuster les taux de défaillance des équipements afin de les rapprocher des données d'exploitation (données réelles). Ces méthodes sont généralement différentes de celles obtenues dans les laboratoires lors des essais.

L'approche utilisée dans ce projet d'étude pour estimer la fiabilité du système dans des conditions hostiles combine deux méthodes. La première méthode, utilisée pour la prédiction de la fiabilité des composants électroniques, est le "Part Stress Analysis" décrite dans le MIL-HDBK-217F. Quant à la deuxième méthode, utilisée pour les composants mécaniques est décrite dans le "Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment".

Ce projet de recherche commence par une modélisation, d'un ensemble de six (6) vannes pneumatiques, faisant partie d'un système simplifié de sûreté d'une centrale nucléaire de type CANDU 600, par la méthode des arbres de défaillance. Des calculs des taux de défaillance des relais et des électrovannes, obtenus par les deux méthodes citées plus haut, ont permis de définir les paramètres de fiabilité du système dans les conditions hostiles. Plusieurs simulations ont été effectuées sur le modèle dans les deux conditions (exploitation normale et environnement hostile) et des comparaisons entre leurs paramètres de fiabilité ont été réalisées.

Ces comparaisons ont permis non seulement d'identifier les relais comme composants les plus critiques, mais aussi de déterminer la valeur critique du taux de défaillance, au-delà de laquelle une légère variation des taux de défaillance des relais affecte considérablement la disponibilité du système. De ce fait, le choix des relais devient extrêmement important pour un bon fonctionnement du système des vannes lors d'un accident majeur ou lors d'une grande évolution des conditions environnementales au sein d'un CANDU 600. Finalement, une validation des résultats par l'analyse des facteurs d'importance de l'ensemble des composants du système a permis de justifier les résultats obtenus.

## REMERCIEMENTS

J'exprime ma gratitude envers la direction d'Hydro-Québec et spécialement aux dirigeants de la centrale nucléaire Gentilly-2 pour m'avoir offert un stage d'étude pour réaliser ce projet de recherche.

Je suis particulièrement reconnaissant à mon directeur de projet, le professeur M. Georges Abdul-Nour de l'université du Québec à Trois-Rivières et à mon codirecteur, M. Raynald Vaillancourt de la centrale nucléaire Gentilly-2, sans qui ce projet n'aurait pas vu le jour.

Un merci spécial au professeur René Rochette, de l'université du Québec à Trois-Rivières et à M. Sandro Sava, de la centrale nucléaire de Gentilly-2, qui ont lu et commenté le manuscrit.

Je suis également reconnaissant à tout le personnel du groupe fiabilité de la centrale nucléaire de Gentilly-2 qui m'ont aidé, par leurs suggestions et leurs conseils, à réaliser ce projet.

Mes remerciements iront également à M. Réjean Comeau, de la centrale nucléaire Gentilly-2, dont les conseils avisés ont été des plus précieux.

## AVERTISSEMENT

Hydro-Québec se dégage de toute responsabilité quant à l'utilisation ou l'interprétation qui pourrait être faite des données contenues dans ce rapport par tierce partie. En aucun cas, Hydro-Québec ne saurait être tenue responsable de tout dommage ou préjudice quelconque lié à une utilisation ou une interprétation fautive de tout ou partie du contenu de ce rapport.

## TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	ii
REMERCIEMENT.....	iv
AVERTISSEMENT.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTES DES FIGURES.....	x
LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS.....	xi
LEXIQUE DES TERMES UTILISÉS.....	xiii

## CHAPITRES

### I INTRODUCTION

1.1 Introduction.....	1
1.2 Les méthodes d'évaluation de la sûreté.....	2
1.3 L'EPS dans les centrales nucléaires.....	3
1.4 Présentation du présent mémoire.....	3
1.5 Démarche suivie.....	6
1.6 Originalité de la présente Étude.....	7

### II NOTIONS DE SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT

2.1 Historique.....	8
2.2 Fiabilité.....	11

### III INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT SUR LA FIABILITÉ

3.1 Introduction.....	21
-----------------------	----

3.2	Influence de l'atmosphère.....	22
3.3	Conclusion.....	28
IV PRÉVISION DE LA FIABILITÉ		
4.1	Mode de défaillance.....	29
4.2	Ajustement des taux de défaillance des équipements électroniques.....	31
4.3	Ajustements des taux de défaillance des équipements mécaniques.....	47
4.4	Études faites à la centrale nucléaire G2.....	48
4.5	Conclusion.....	49
V DESCRIPTION DU SYSTÈME		
5.1	Description de la simplification du système à l'étude.....	50
VI CALCUL DE L'INDISPONIBILITÉ DU SYSTÈME		
6.1	Introduction.....	55
6.2	Méthodologie.....	56
6.3	Démarche suivie.....	57
6.4	Calcul du taux de défaillance des électrovannes.....	57
6.5	Calcul du taux de défaillance des relais.....	61
6.6	Calcul de l'indisponibilité du système des vannes.....	63
6.7	Facteurs d'importances.....	77
6.8	Conclusion.....	79
6.9	Conclusion générale.....	80
BIBLIOGRAPHIE.....		84
ANNEXES		
A. Modèle SAU#2-0, modèle et description .....		86
B. Modèle SAU#2-1, simplification du modèle SAU#2-0.....		97
C. Modèle SAU#2-2, simplification du modèle SAU#2-1.....		101



D. Description des défauts observés sur les vannes.....	105
E. Présentation du logiciel CAFTA.....	109

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1. Facteurs d'ajustements des taux de défaillances .....	34
Tableau 4.2. Valeurs de ECF .....	41
Tableau 4.3. Facteur de charge en fonction du type de charge.....	44
Tableau 4.4. Détermination du nombre de portes en fonction du nombre de transistors.	46
Tableau 6.1. Taux de défaillances des équipements dans les deux environnements.....	64
Tableau 6.2. Indisponibilité du système dans les conditions normales.....	65
Tableau 6.3. Indisponibilité du système dans les conditions hostiles.....	66
Tableau 6.4. Indisponibilité du système dans les deux milieux.....	68
Tableau 6.5. Indisponibilité du système en fonction du taux de défaillances des $P_v$ .....	71
Tableau 6.6. Indisponibilité en fonction du taux de défaillances des relais et des $P_v$ .....	74

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1. Les composants de la sûreté de fonctionnement.....	10
Figure 5.1. Principe d'injection de poison.....	50
Figure 5.2. Fonctionnement du système.....	51
Figure 5.3. Vannes à ouverture rapide.....	52
Figure 5.4. Système avec les séries qui ont reçu le signal, 1 chaîne actionnée.....	53
Figure 5.5. Système avec les séries qui ont reçu le signal, 2 chaînes actionnées.....	53
Figure 6.1. Variation de l'indisponibilité, dans les conditions normales.....	67
Figure 6.2. Variation de l'indisponibilité, dans les conditions hostiles.....	67
Figure 6.3. Variation de l'indisponibilité, dans les deux conditions.....	69
Figure 6.4. Variation de l'indisponibilité du système en fonction des $P_v$ et des relais....	73
Figure 6.5. L'indisponibilité en fonction des taux de défaillances des $P_v$ et des relais...	76

## LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

A	: Indisponibilité
C	: Numéro d'équation utilisée par CAFTA
CAFTA	: Logiciel de modélisation et d'analyse d'arbre de défaillance
CANDU	: "Canadian Deuterium Uranium"
CNET	: Centre national des études de télécommunication
FTL	: "Forsvares Telekiska Laboratorium"
G2	: Centrale nucléaire de Gentilly 2, type CANDU 600
GTPROB	: Logiciel de calcul des probabilité des événements de tête et intermédiaires, support de CAFTA.
IEEE, STD	: Recueil de données de fiabilité observées et concernant des équipements électriques, électroniques et mécaniques installés dans les centrales nucléaires.
MDT	: "Mean Down Time"
MTTF	: Durée moyenne de fonctionnement avant défaillance
MTTR	: "Mean Time to Repair"
MUT	: "Mean Up Time"
P	: Probabilité
Pv	: Ensemble formé de vannes et d'électrovannes.
RADC	: "Rome Air Development Center Reliability Note Book"
SAU#2	: Simplification d'un système d'arrêt d'urgence numéro 2, (CANDU 600)
SAU#2-0	: Modèle d'arbre de défaillance de l'ensemble constitué de six vannes d'injection d'hélium du système simplifié d'arrêt d'urgence # 2
SAU#2-1	: Modèle d'arbre de défaillance, simplification de SAU#2-0
SAU#2-2	: Modèle d'arbre de défaillance, simplification de SAU#2-1

AIEA	: Agence internationale de l'énergie atomique
EPS	: Étude probabiliste de sûreté
CCEA	: Commission de contrôle de l'énergie atomique

## LEXIQUE DES TERMES UTILISÉS

Ces définitions sont tirées de la norme internationale CEI 50 (191), Vocabulaire Électrotechnique.

- Entité : Tout élément, composant ou sous-système, unité fonctionnelle, équipement ou sous-système que l'on peut considérer individuellement.
- Entité réparée : Entité réparable qui est effectivement réparée après défaillance.
- Entité non réparée : Entité qui n'est pas réparée après défaillance.
- Fonctions requises : Fonction ou ensemble de fonctions d'une entité dont l'accomplissement est considéré comme nécessaire pour la fourniture d'un service donnée.
- Mode de fonctionnement : Sous-ensemble de l'ensemble complet des fonctions possibles d'une entité.
- Exploitation : Combinaison de toutes les actions techniques et administratives destinées à permettre à une entité d'accomplir une fonction requise en l'adoptant, selon la nécessité, aux variations des conditions extérieures.

- Panne : État d'une entité incapable d'accomplir une fonction requise, non comprise l'incapacité due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou due à un manque de moyens extérieurs.
- Défaillance : Cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise.
- Indisponibilité (instantanée) : Probabilité qu'une entité ne soit pas en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données à un instant donné, en suppose que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée.
- Essai : Opération faite en vue de mesurer ou de classer un caractère ou une autre propriété d'une entité.
- Essai en laboratoire : Essai de conformité ou essai de détermination conduit dans des conditions prescrites et contrôlées qui peuvent ou non simuler des conditions d'exploitation.
- Essai accéléré : Essai au cours duquel le niveau des contraintes appliquées à une entité est choisi au-delà du niveau qui correspond aux conditions de référence en vue de réduire la durée nécessaire pour observer les réponses de l'entité aux contraintes ou en vue d'accentuer ces réponses pour une durée donnée.
- Analyse de défaillance : Examen logique et systématique d'une entité après une défaillance en vue d'identifier et d'analyser le mécanisme de défaillance, la cause de défaillance et les conséquences de la défaillance.

## CHAPITRE I

### INTRODUCTION

#### **1.1 Introduction**

Le développement rapide des outils et des systèmes qui nous entourent et leurs complexités, nous obligent à s'intéresser à leur sûreté, si nous voulons qu'ils concourent réellement à notre sécurité et à notre confort.

Cette sécurité n'est atteinte que si toutes les installations, systèmes et équipements sont sécuritaires. Il fallait donc, s'intéresser de près à la sûreté de fonctionnement qui par ses techniques de fiabilité nous permet de connaître le fonctionnement de ces systèmes, leurs caractéristiques, leurs modes de défaillance et les mécanismes qui entraînent ces défaillances, dans le but de prédire leurs comportements dans le temps, d'apporter les solutions adéquates et d'évaluer leur fiabilité.

Cette évaluation de fiabilité des équipements est nécessaire, non seulement pour la maintenance de ces systèmes, mais aussi pour l'évaluation d'un risque qui peut se produire, suite et lors d'un accident.

Dans le domaine nucléaire, comme dans tous les secteurs où les niveaux de sûreté sont hautement exigés, ces risques sont sujets à plusieurs études de fiabilité, afin de déterminer, d'une part, l'impact de ces derniers sur la sûreté des biens et des personnes et d'autre part, d'apporter les solutions et les moyens nécessaires pour minimiser la réalisation de ces accidents.



## **1.2 Les méthodes d'évaluation de la sûreté**

Les centrales nucléaires disposent de limites de sûreté au-delà desquelles, lors d'une défaillance grave de procédé, la défaillance de plusieurs barrières de protection conduit inévitablement à des accidents graves.

Une étude probabiliste de sûreté (EPS) a pour objectif principal, l'évaluation des capacités ou des réserves de sécurité et d'identifier les limites de sûreté de l'installation. En plus de la capacité des EPS de quantifier le risque des accidents graves, elles sont en mesure d'identifier les points faibles de la conception et de suggérer les actions à entreprendre pour maîtriser ces déviations et limiter leurs conséquences.

Deux méthodes, l'une déterministe et l'autre probabiliste sont actuellement utilisées. Ces méthodes sont employées pour évaluer et améliorer la sûreté de la conception et de l'exploitation.

### **1.2.1 Méthode déterministe**

Dans la méthode déterministe, des événements de référence sont choisis comme enveloppe d'une série d'événements initiateurs qui, sans égard à leurs fréquences d'occurrence, pourraient mettre en danger la sûreté de l'installation. Une analyse est faite pour montrer que la réaction de l'installation et de ses systèmes de sûreté aux événements de références satisfait à des spécifications prédéterminées en ce qui concerne à la fois le comportement de l'installation elle-même et les buts de sûreté à atteindre. (AIEA, 1990).

### **1.2.2 Méthode probabiliste**

L'analyse probabiliste, mieux connue sous le nom d'évaluation probabiliste de sûreté (EPS), est employée pour évaluer la probabilité de tout scénario particulier d'événements et de ses conséquences. Cette évaluation peut

prendre en considération les effets des mesures d'atténuations prises à l'intérieur et à l'extérieur de l'installation. L'EPS est utilisée pour estimer le risque et spécialement pour repérer toute faiblesse possible, dans la conception et l'exploitation qui pourrait représenter une contribution excessive au risque. (AIEA, 1990).

### **1.3 L'EPS dans les centrales nucléaires**

Dans une centrale nucléaire, d'importantes mesures de sûreté sont mises en œuvre afin de prévenir tout accident pouvant avoir de graves conséquences. Le niveau de sûreté correspondant est démontré et contrôlé par les analyses de sûreté (probabilistes et déterministes) et le retour d'expérience. Le présent mémoire se base sur une approche probabiliste pour déterminer et évaluer des paramètres de fiabilité d'une partie d'un système qui assure l'arrêt de la centrale lors d'un accident majeur.

### **1.4 Présentation du présent mémoire**

#### **1.4.1 Mise en contexte et problématique de recherche**

Dans les centrales nucléaires, plusieurs équipements sont ou pourraient être requis de fonctionner dans des conditions hostiles lors d'un accident majeur. Ces équipements doivent donc être qualifiés pour les conditions auxquelles on s'attend qu'ils seront requis. Lorsqu'un équipement est qualifié, le taux de défaillance utilisé dans les analyses de fiabilité des équipements, se base sur les données observées en exploitation normale. Lorsqu'un équipement n'est pas qualifié, on le considère comme défaillant dans ces conditions hostiles donc complètement indisponible.

Toutefois, un équipement non qualifié pour certaines conditions hostiles pourrait continuer à fonctionner dans ces conditions, mais avec un taux de défaillance beaucoup plus élevé et totalement inconnu. Pour les équipements

qualifiés, le taux de défaillance actuellement utilisé n'est peut-être pas représentatif de la réalité.

Ce projet de recherche consistera donc à définir des critères de pondération des taux de défaillance en fonction des conditions hostiles attendues pour des équipements qualifiés et d'autres pour des équipements non qualifiés. Les paramètres constituant l'enveloppe de qualification sont : température, pression, humidité, inondation, condensation et vibration.

En premier lieu, le travail consistera en une recherche bibliographique exhaustive, dans le but, de recenser les études et les recherches qui ont été faites dans ce domaine et en deuxième lieu, à l'analyse des critères utilisés dans des analyses de fiabilité similaires. En fin, une étude de la simplification d'un système de la centrale nucléaire GENTILLY-II (G2), validera le travail, et des recommandations seront élaborées.

#### **1.4.2 But et objectifs**

Cette étude a pour but, la pondération des taux de défaillances des équipements qui opèrent dans un milieu hostile. Son objectif principal peut être résumé dans les étapes suivantes :

- 1 Analyse et documentation des méthodes de pondération des paramètres de fiabilité et des méthodes de modélisation de la fiabilité prévisionnelle et leurs applications.
- 2 Déterminer l'impact des facteurs qui représentent les conditions environnementales sur système à l'étude à savoir un ensemble de 6 vannes pneumatiques à commandes à relais.
- 3 Déterminer les modes de défaillances des vannes et leurs causes.
- 4 Modéliser le système des vannes par la méthode des arbres de défaillance.

- 5 Calculer la disponibilité du système à partir des données d'exploitation utilisées actuellement.
- 6 Calculer la disponibilité du système en tenant compte de l'influence des conditions environnementales sur l'ensemble de vannes.
- 7 Comparer les résultats obtenus.
- 8 Conclusion et recommandations.

### **1.4.3 Méthodologie**

Pour retirer tous les bénéfices de cette étude, nous avons structuré notre travail d'une façon restrictive.

Le chapitre 2, intitulé Notion de sûreté de fonctionnement, fournit au lecteur les éléments de bases nécessaires à la compréhension du présent mémoire.

Le chapitre 3, présente l'influence de l'atmosphère et explique l'influence des conditions atmosphériques sur la fiabilité des équipements.

Le chapitre 4, ajustement des taux de défaillance, est le fruit de notre recherche bibliographique. On trouve l'ensemble des études utilisées dans le domaine de la prévision de la fiabilité.

Le chapitre 5, système à l'étude, quant à lui est consacré à l'étude du système de vannes pneumatiques.

Le chapitre 6 est consacré principalement au calcul de l'indisponibilité du système ainsi qu'à la comparaison et à l'analyse des résultats obtenus de plusieurs simulations sur le système étudié et cela dans les deux cas suivants :

- a) en exploitation normale
- b) dans des conditions hostiles.

La conclusion générale est un résumé de l'analyse de l'ensemble des résultats obtenus ainsi qu'aux recommandations.

#### **1.4.4 Recherche bibliographique**

La recherche bibliographique de cette étude est basée sur trois genres de documents différents, qui feront l'objet d'une analyse détaillée dans le chapitre 4.

- Standards
- Études probabilistes réalisées au sein de G2.
- Articles parus dans des revues scientifiques.

Cette section présente les principaux éléments de la recherche bibliographique. Le lecteur trouvera en référence une liste plus exhaustive des documents consultés.

##### **1.4.4.1 Standards**

En électronique, les deux bases de données les plus utilisées sont le Military Handbook 217 (F), et le recueil de fiabilité du Centre National d'Études des Télécommunications (CNET). En mécanique, les recueils de données existants sont moins reconnus qu'en électronique, mais ils sont très utilisés. On peut citer, le standard des études en mécanique "Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment" et le standard IEEE STD 500 : recueil de données de fiabilité observées et concernant des équipements électriques, électroniques et mécaniques installés dans les centrales nucléaires.

##### **1.4.4.2 Études probabilistes réalisées au sein de G2**

Plusieurs études de fiabilité réalisées au sein de G2, par du personnel de la section fiabilité ont été consultées.

##### **1.4.4.3 Documentations**

Tous les documents consultés seront débattus au chapitre quatre (4).

## **1.5 Démarche suivie**

Étant donné que le système des vannes est formé principalement d'un ensemble de composants électriques et mécaniques, la démarche suivie est basée essentiellement sur les deux standards suivants :

- MIL-HDBK-217F
- Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment.

Dans un premier temps, une évaluation des paramètres de fiabilité du système à étudier, à partir des données d'exploitation à G2 sera effectuée et dans un second temps, une évaluation des paramètres de fiabilité du même système dans les conditions hostiles sera réalisée. Enfin, une comparaison des résultats obtenus sera élaborée

## **1.6 Originalité de la présente étude**

Cette étude a la connaissance de l'auteur, est la première à essayer d'évaluer la fiabilité prévisionnelle des équipements qui opèrent dans des conditions hostiles dans une centrale nucléaire, de type CANDU 600, par une approche probabiliste.

## CHAPITRE II

### NOTIONS DE SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT

#### 2.1 Historique

La sûreté de fonctionnement comme science, regroupe les techniques de fiabilité, de disponibilité, de maintenabilité et de sécurité. Elle s'est développée tardivement par rapport à d'autres techniques classiques de l'ingénieur. En fait c'est au début de l'ère industriel dans les années 30 et avec l'expansion du chemin de fer, que commençaient les études reliées à la sûreté des systèmes dans le domaine mécanique et celles-ci s'intéressaient à l'époque à l'étude des roulements à billes.

L'apparition de l'électricité a aidé au développement des techniques de sûreté et notamment la fiabilité des équipements et des systèmes électriques. Le développement de l'aéronautique par après a contribué considérablement à l'amélioration des concepts de la fiabilité, en introduisant la notion du : recueil des données statistiques sur les fréquences des pannes de divers équipements utilisés dans l'aviation.

Ce n'est que dans les années 40 et pendant la seconde guerre mondiale que les techniques de sûreté de fonctionnement ont été élaborées et les premiers modèles de fiabilité prévisionnelle ont vu le jour en Allemagne par la suite des échecs du lancement des missiles V1. En même temps aux États-Unis on s'intéressait à cette époque à deux composants : l'amélioration de la qualité par une meilleure conception et l'amélioration de la vie utile des composants par le contrôle, c'est ainsi que Général motors a augmenté la durée de vie de ses moteurs d'attraction

de 250 000 miles à 1 000 000 de miles.

Dans les années 50 et notamment aux États-Unis, les études de fiabilité ont été poussées notamment dans le domaine militaire suite au développement inattendu des équipements électroniques surtout militaires, de plus en plus complexes ce qui a généré des taux de pannes fréquents, une disponibilité réduite et des coûts de maintenance très élevés.

Dans les années 60, les études de sûreté se sont consacrées essentiellement au développement des techniques reliées à la fiabilité et leurs élargissements à diverses applications. C'était le début des analyses détaillées relatives aux défaillances de composants et à leurs effets sur le fonctionnement des systèmes ou sur la sécurité des biens et des personnes dans plusieurs domaines et, essentiellement, dans le domaine nucléaire où les études de fiabilité prévisionnelles étaient développées. Ces notions s'étalèrent par la suite à d'autres domaines comme l'aéronautique vers la fin des années 60.

Au début des années 70 et pendant les années 80, les méthodes de prévision de fiabilité ont continué à se développer et s'intéressaient aux risques liés à des installations industrielles. Dans le domaine nucléaire et pétrochimique, plusieurs études ont porté sur la sécurité des populations et le risque que présentent ces industries dans plusieurs pays et notamment aux États-Unis, en France et en Angleterre.

Dans les grandes usines de production et essentiellement au Japon, de nouvelles techniques comme les cercles de qualité, ont été introduites afin d'améliorer la fiabilité et la qualité des produits. C'est à cette époque aussi que plusieurs travaux ont été effectués sur la fiabilité des logiciels.

À partir du milieu des années 80 et suite à l'extension des usines de production, la concurrence et la complexité des produits d'une part et le nombre élevé des accidents, d'autre part, ont amené à considérer comme primordiales les études de fiabilité, de maintenabilité, de disponibilité et de sécurité des produits, des systèmes



et de personnes. Ce qui a donné naissance à la science de la sûreté de fonctionnement qui a pour but de mesurer la qualité de service, délivrée par un système, de manière à ce que l'utilisateur ait en lui une confiance justifiée. Cette confiance justifiée s'obtient à travers les analyses qualitatives et quantitatives des différentes propriétés du service délivré par le système. Ces différentes propriétés sont basées sur les valeurs probabilistes définies ci-après.

Fiabilité : probabilité qu'une entité puisse accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné  $[t_1, t_2]$  ; que l'on écrit :  $R(t_1, t_2)$ . Cette définition, celle de la CEI (commission électrotechnique internationale), est donnée dans la norme 191 de juin 1988.

Disponibilité : probabilité pour qu'une entité soit en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant donné  $t$  ; On la note  $D(t)$ .

Maintenabilité : probabilité pour qu'une opération donnée de maintenance active puisse être effectuée pendant un intervalle de temps donné  $[t_1, t_2]$  que l'on note :  $M[t_1, t_2]$ .

Sécurité : probabilité d'éviter un événement dont les conséquences sont dangereuses.

Les relations entre les différentes composantes de la sûreté de fonctionnements des systèmes sont illustrées sur la figure 2.1

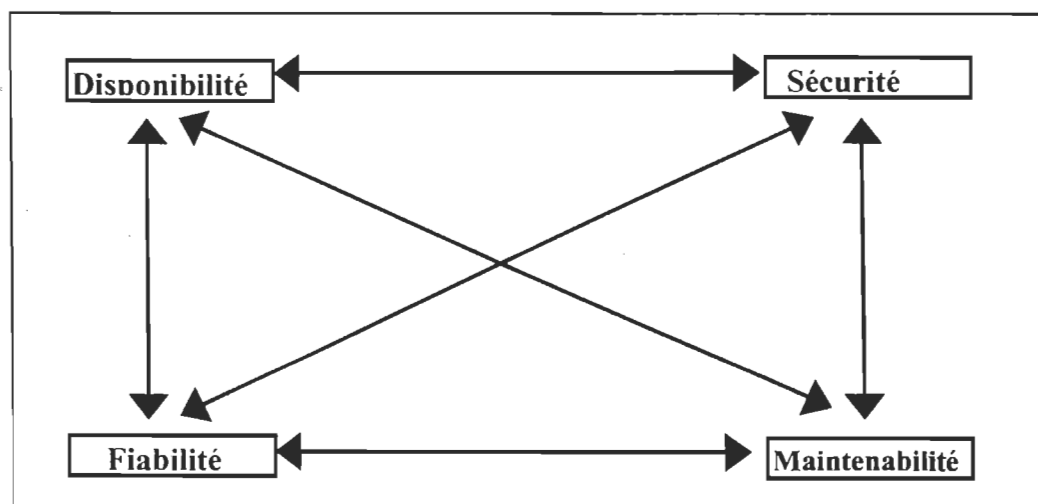


Figure 2.1 Les composants de fonctionnement

## **2.2 Fiabilité**

### **2.2.1 Introduction**

La fiabilité s'intéresse à l'ensemble des mesures à prendre pour qu'un produit, un système ou une entité fonctionne sans défaillance ou avec une fréquence de défaillance suffisamment faible pour être acceptable dans l'usage prévu. Sa conservation concerne la maintenabilité qui s'occupe de ce qu'il faut faire pour qu'un produit soit ramené dans des conditions aussi proches que possible de celles prévues au début de son fonctionnement.

Le but de la fiabilité et de la maintenabilité est de garantir au client un usage prévu au coût total minimal pendant la période spécifiée, dans des conditions d'entretien et de réparation précises.

### **2.2.2 Histoire de la fiabilité**

A l'époque de la préparation de la seconde guerre mondiale, les techniques industrielles étaient relativement peu avancées et, pratiquement, il n'existait aucune demande de fiabilité. Les appareils de l'époque étaient simples et utilisaient peu de composants. Les conditions climatiques, vibratoires et de choc n'étaient pas excessifs. La fiabilité pouvait donc être considérée comme acceptable.

Pendant la deuxième guerre mondiale, à la suite des changements rapides, et dû au fait que la guerre se déroulait dans le désert et dans les zones humides, l'équipement devint plus sophistiqué, tandis que la probabilité d'apparition des défaillances augmentait rapidement, quelques données statistiques publiées par l'administration de l'armée américaine, montrent la gravité de la situation. La plupart de l'équipement électronique n'était en état de fonctionner que pendant 30% du temps et les frais de réparation et de maintenance du parc étaient dix fois plus grands que les coûts payés à l'achat.

Ce n'est que depuis les années 70 qu'on a commencé à s'intéresser au problème de fiabilité comme conséquences logiques de la complexité des équipements.

Dans le passé, il n'y avait pas de spécification concernant la fiabilité, car on ne savait pas quels sont les paramètres qui déterminent la fiabilité des installations et des équipements. Cela explique pourquoi les fabricants n'ont eu longtemps, aucun moyen d'apprécier le comportement dans le temps des équipements qu'ils livraient.

La notion de «fiabilité » est ainsi liée à la création assez récente d'un corps de concepts et de méthodes dont leur histoire reste difficile à reconstituer vu leur inégal développement suivant les branches.

### 2.2.3 Définition

La définition adoptée par le groupe de travail 56 de la Commission Électrotechnique Internationale (CEI) est la suivante : "la fiabilité est une caractéristique d'un dispositif, exprimée par la probabilité qu'il accomplisse une fonction requise dans des conditions données, pendant un temps donné".

La fiabilité se caractérise par quatre concepts :

- LA PROBABILITÉ : la probabilité est le rapport entre le nombre de cas favorables, à la réalisation d'un événement et le nombre de tous les cas possibles. L'événement étant dans le cas de la fiabilité l'accomplissement d'une fonction, la probabilité exprime les chances de réussite.

L'ACCOMPLISSEMENT D'UNE FONCTION REQUISE : la fonction a besoin d'être définie de façon précise, on ne peut pas évaluer la fiabilité d'un dispositif sans connaître exactement le rôle de qu'il doit jouer, donc les contraintes qu'il subira par voie de conséquences.

Le dispositif devra être dans un état qui lui permette d'accomplir la fonction requise d'une manière satisfaisante. Ceci implique un certain niveau minimum de performances au-delà desquelles le dispositif est considéré comme défaillant. Il est fondamental de bien définir ce niveau minimum de performances, c'est ce qu'on appelle communément le critère de défaillance.

Si le niveau de minimum de performance ne peut être obtenu, le dispositif n'assure plus le fonctionnement, il présente un certain état défectueux, ce que l'on appelle un mode de défaillance.

DES CONDITIONS DONNEES : ces conditions sont relatives à l'environnement et à l'utilisation. Ce sont les contraintes physiques, chimiques, électriques et mécanique subit par le dispositif : conditions du milieu (ambiance), actions provoquées par son interaction avec d'autres dispositifs. Ces "conditions données" peuvent s'exprimer sous forme d'un profil de mission : évolution de l'amplitude de chaque type de contrainte subie en fonction du temps a pour la mission prévue.

LE TEMPS : la notion du temps est exprimée par le nombre de cycles, par une distance parcourue et d'une façon générale, un âge ou une caractéristique qui exprime l'âge atteint. Dans bien des cas, le "pendant un temps donné" de la définition, est remplacé par " pour une mission donnée". On s'intéresse par exemple à la probabilité qu'un moteur fonctionne correctement pendant un mois. "Le temps donné" est donc la durée de la mission : un mois et le profil de la mission, il exprime l'évolution de l'ensemble des contraintes appliquée pendant un mois : choc, vibration, humidité, température,... Etc.

## **2.2.4 Défaillances**

Les équipements électroniques comme les équipements mécaniques, sont sujets à des défaillances. L'assurance de leur fiabilité et sa prévision est fonction du type de ces défaillances, qu'on peut classer en trois catégories selon l'âge du dispositif.

PÉRIODE DES DÉFAILLANCES PRÉCOCES : appelée aussi période de jeunesse ou période de mortalité infantile pendant laquelle le taux de défaillance en fonction du temps décroît rapidement.

PÉRIODE À TAUX DE DÉFAILLANCE CONSTANT : après de fortes valeurs du taux de défaillance instantanée, le dispositif atteint l'âge adulte où les défaillances sont accidentelles et donc indépendants de l'âge.

PÉRIODE À TAUX DE DÉFAILLANCE D'USURE : à cause du vieillissement et du processus de détérioration, le taux de défaillance augmente rapidement.

### 2.2.5 Fiabilité en électronique et en mécanique

La période des défaillances précoces existe aussi bien en électronique qu'en mécanique, elle est caractérisée par des points fragiles causés par une fabrication qui n'est pas parfaitement homogène.

En électronique, pour dépasser cette période et ramener le composant ou l'équipement considéré à un âge qui correspond à  $t_1$ , figure 2.2, il est fréquent de le faire fonctionner pendant une durée de l'ordre de 100 heures à 250 heures ou bien de lui faire subir différents traitements.

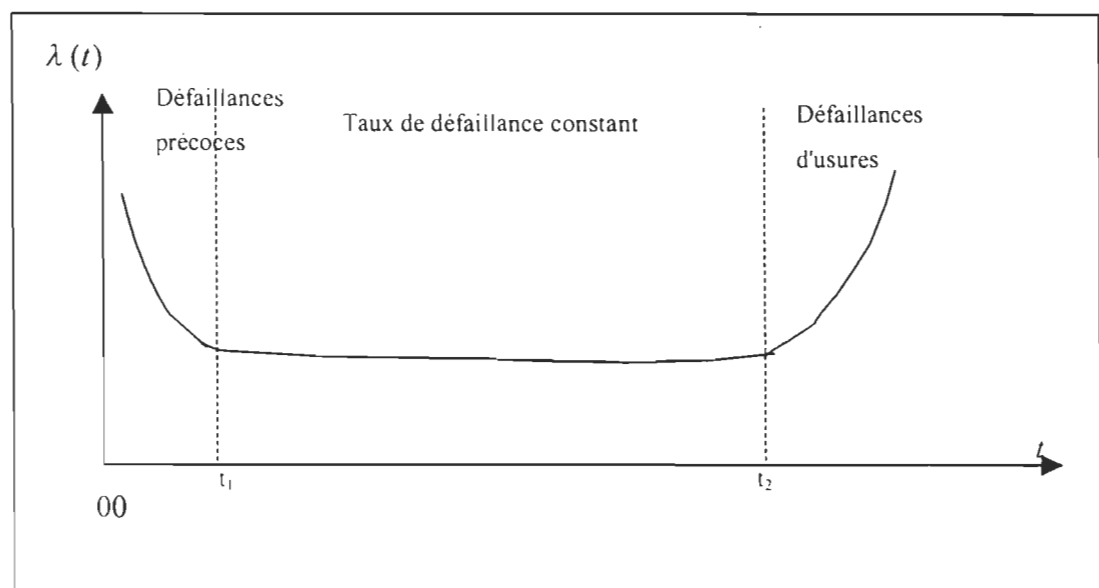


Figure. 2.2. Courbe "en baignoire"

Ainsi les dispositifs électroniques qui paraissent anormaux parce que certaines de leurs caractéristiques ne répondent pas aux exigences prédéfinies, seront retirés. Par contre en mécanique on a recours au rodage d'une part et aux essais accélérés d'autre part.

La seconde période s'explique pour l'électronique par l'apparition des défaillances catalectiques (défaut, franc, coupure, court-circuit) survenant sur les composants électroniques qui, déjà avant leur mise en service possédaient un vice caché, comme : des mauvaises soudures par exemple, les défaillances apparaissent lorsqu'il y a eu une certaine accumulation de contraintes lors de l'utilisation normale ou lorsque des contraintes dépassent un certain seuil qui diminue avec l'âge.

Notons que ces composants n'étaient pas détectés lors des contrôles prévus. (Cette seconde période est pratiquement inexistante pour les dispositifs mécaniques) En mécanique comme en électronique, la période des taux de défaillance constants est en fait une juxtaposition des périodes précoces et une période d'usure qui commence progressivement. Cependant les résultats obtenus lors de la combinaison des deux courbes illustrées sur les figures. 2.2 et 2.3 (Utilisation des techniques de fiabilité en mécanique) [2] ne donnent pas le même résultat pour les deux équipements.

L'influence de l'usure apparaîtrait très lentement et très progressivement dès le début pour l'électronique, beaucoup plus tard, mais plus rapidement pour la mécanique.

On peut constater que la période d'usure pour les équipements électroniques est très éloignée et il est reconnu que le taux de défaillance constant d'un composant électronique simple utilisé dans des conditions normales est extrêmement faible.

Cette dernière caractéristique représente un avantage pour la fiabilité de ce composant, mais rend les calculs prévisionnels de cette dernière, avec un pourcentage d'erreur minime très difficile, car le problème est qu'il est impossible de savoir si le facteur d'accélération obtenu lors des essais accélérés s'applique à la valeur du taux de défaillance constant ou à une accélération de l'usure.

On peut constater cette problématique dans les données qui sont publiées dans des ouvrages spécialisés publiées par des organismes à travers le monde

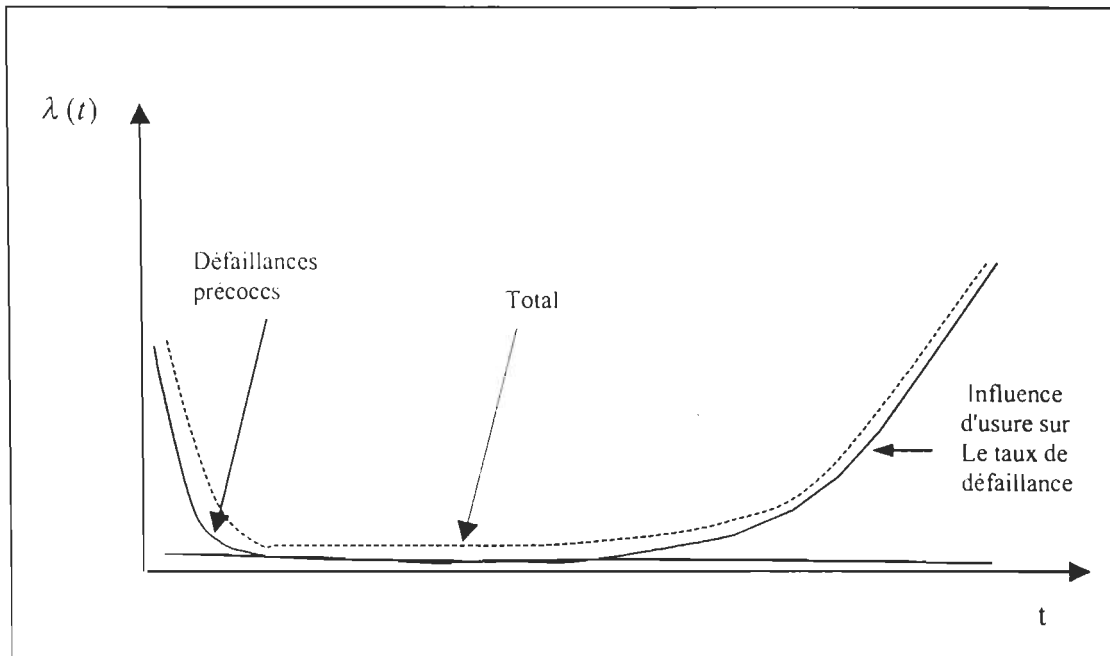


Figure. 2.2. Combinaisons des taux de défaillance précoce et d'usure pour l'électronique

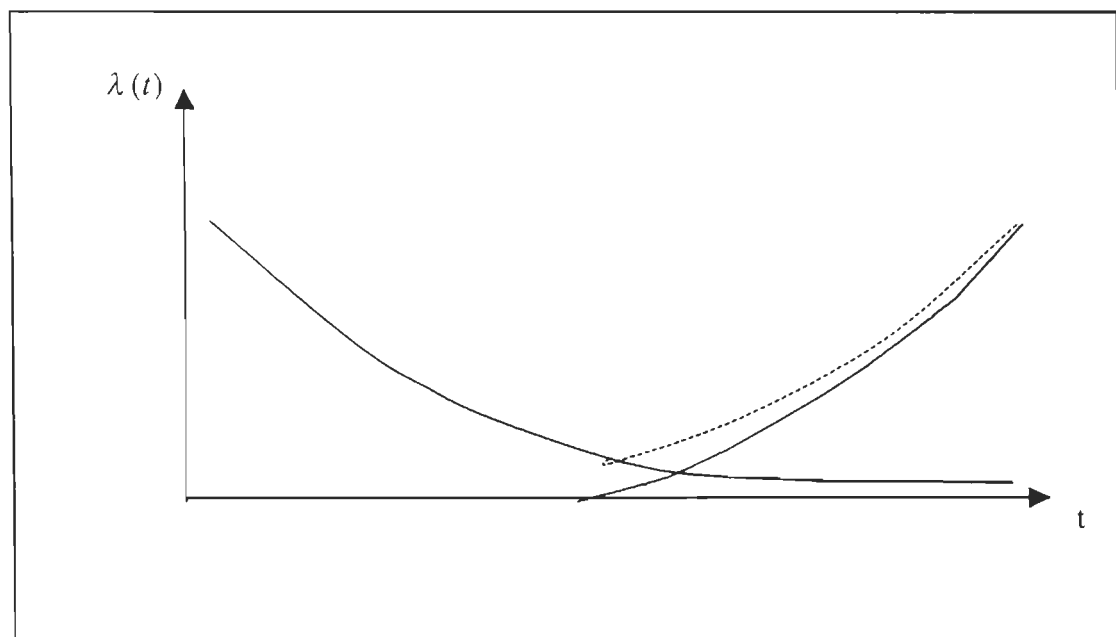


Figure 2.3. Combinaison des défaillances précoces et d'usure pour la mécanique

comme la RADC (Rome Air Development Center Reliability Note Book), la FARADA, FTL (Forsvares Telekiska Laboratorium, laboratoire suédois), MIL-HDK-217F (Militar Handbook) , CNET (Centre National d'études des Télécommunications), et bien d'autres encore, fournissant des valeurs qui peuvent varier d'un rapport de 10 à 1000) et qui varient d'une source à l'autre

Seulement, une analyse physico-chimique des défaillances pourrait distinguer celles qui sont reliées à l'usure de celles qui correspondent aux taux de défaillance constants. Par contre en mécanique il est constaté que si les essais non destructifs ont pu éliminer toute défaillance précoce et si l'équipement est utilisé dans des conditions normales prévues, le taux de défaillance sera presque nul jusqu'à l'apparition des premières manifestations d'usure.

### 2.2.6 Paramètres de fiabilité

La fonction fiabilité est relative à la variable aléatoire temps (ou nombre de cycles ou nombre de kilomètres...) qui est continue ou considérée comme telle. Si on considère une densité de probabilité de défaillance ou de décès à

un âge  $t$  soit  $f(t)$ . Son intégrale :  $\int_0^t f(x)dx$  est la fonction de répartition  $F(t)$

qui représente la probabilité de défaillance à un temps  $x$  antérieur à  $t$ . La fiabilité est définie comme la probabilité de non défaillance jusqu'à un temps  $t$ , donc c'est l'événement complémentaire du précédent :

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (2.1)$$

en dérivant, on obtient :

$$\frac{dR(t)}{dt} = -f(t) \quad (2.2)$$



avec :  $R(0) = 1$  et  $R(\infty) = 0$

$R(t)$  est donc une fonction monotone non croissante.

Taux instantané de défaillance : noté  $\lambda(t)$  est la limite, si elle existe, du quotient de la probabilité conditionnelle pour que l'instant  $T$  d'une défaillance d'une entité soit compris entre dans un intervalle de temps donné  $(t + \Delta t)$  par la durée  $\Delta t$  de l'intervalle de temps, lorsque  $\Delta t$  tend vers zéro, en supposant que l'entité soit disponible au début de l'intervalle de temps.

Taux de défaillance équivalent : Le taux de défaillance équivalent à l'instant  $t$  est la probabilité pour qu'un système perde sa capacité à accomplir une fonction pendant l'intervalle  $[t, t+dt]$ , sachant qu'il n'a pas été en panne entre  $[0, t]$  ; on le note :  $\lambda_{eq}(t)$ .

MTTF (Mean Time To Failure) : temps moyen de bon fonctionnement avant la première défaillance.

MTBF (Mean Time Between Failure) : temps moyen entre deux défaillances d'un système réparable.

MUT (Mean Up Time) : durée moyenne de bon fonctionnement après réparation.

MTTR (Mean Time To Repair) : durée moyenne de réparation.

MDT (Mean Down Time) : durée moyenne de défaillance comprenant la détection de la panne, la durée d'intervention, le temps de réparation et le temps de remise en service.

Taux de réparation : inverse de la durée moyenne de réparation, on le note " $\mu$ "

### 2.2.7 Quelques relations et valeurs Numériques

Il existe de nombreuses relations entre les grandeurs introduites. Pour une loi exponentielle,  $R(t) = \exp(-\lambda t)$  et  $MTTF = 1 / \lambda$ . Or, pour un système non réparable  $MTBF = MTTF$  (en effet toutes les pannes sont alors des premières pannes). Ceci explique la formule classique largement utilisée

pour les composants électroniques (non réparables) :  $MTBF = 1 / \lambda$ . Il ne faut appliquer cette formule que pour des lois exponentielles et, en toute rigueur, pour un composant non réparable.

Lorsque les temps de réparations suivent aussi une loi exponentielle on montre de même que  $MTTR = 1/\mu$ . On a,  $MTBF = MUT + MDT$ . En général  $MDT = MTTR$  mais il faut parfois ajouter les délais logistiques ou de démarrage.

On a de plus, la disponibilité asymptotique qui se traduit par la relation suivante :

$$D_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} (D(t)) = \frac{MUT}{MDT + MUT} = \frac{MUT}{MTBF} \quad (2.3)$$

l'équation 2.3 traduit la définition de la disponibilité qui est le ratio du temps de bon fonctionnement par rapport au temps total.

Indisponibilité asymptotique = 1 - disponibilité asymptotique

$$ID_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} (1 - D(t)) = \frac{MDT}{MDT + MUT} = \frac{MDT}{MTBF} \quad (2.4)$$

Pour des lois exponentielles avec  $MUT = 1/\lambda$  et  $MDT = 1/\mu$ , on arrive à :

$$D_{\infty} = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad \text{et} \quad ID_{\infty} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad \text{où } (\lambda, \mu) \text{ représentent respectivement le}$$

taux de défaillance et de réparation du système.

« $\lambda$ » est souvent négligeable devant « $\mu$ » car le temps de réparation est petit devant le temps moyen avant panne. On peut donc simplifier le dénominateur, on obtient :

$$ID_x = \lambda/\mu = \lambda * MTTR \quad (2.5)$$

Cette dernière formule chiffre dans le cas de lois exponentielles le compromis entre la fiabilité et la maintenabilité qu'il faut optimiser pour améliorer la disponibilité.

## **CHAPITRE III**

### **INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT SUR LA FIABILITÉ**

#### **3.1 Introduction**

L'environnement d'utilisation des équipements joue un rôle très important dans la détermination de la fiabilité. Plusieurs auteurs ont reconnu l'importance du milieu environnant dans la conception des équipements et des efforts ont été déployés avant même que la fiabilité soit reconnue comme une discipline en soi.

Parmi les aspects qui permettent d'éviter la dégradation des équipements, on cite :

- 1- L'identification et la description adéquate de l'environnement auquel sera soumis le futur système.
- 2- La prise en considération de la manière par laquelle divers facteurs du milieu environnant influent sur la fiabilité de l'équipement.
- 3- Le développement des outils et des solutions visant à neutraliser les influences néfastes de l'atmosphère, des radiations, ainsi que les paramètres physico-chimiques qui caractérisent l'environnement.

Notons aussi que le stockage de longue durée peut modifier les performances des équipements.

## 3.2 Influence de l'atmosphère

### 3.2.1 Température élevée

Il est bien connu qu'à partir d'une certaine valeur de température, le taux de défaillance d'un composant ou d'un équipement augmente avec l'augmentation de la température. En fait l'expérience montre que la vitesse des réactions chimiques augmente si on augmente la température. Plusieurs modes de défaillances sont dus à des réactions chimiques qui se manifestent entre le matériel utilisé pour le composant ou l'équipement et une quantité réduite de contaminant qui pourrait apparaître lors de la fabrication du composant ou s'infiltrer à la suite d'une mauvaise étanchéité entre le composant et l'atmosphère. L'interaction entre le composant et une quantité suffisante du contaminant engendre la défaillance du composant soit parce que la réaction consomme le matériel du composant, soit parce que les produits de la réaction endommagent le composant.

Si une masse  $m$  d'un composant quelconque a été soumise à des changements chimiques dus à une impureté, le composant sera défaillant. Si ces changements ont lieu avec un taux de masse  $k$  par heure, le temps nécessaire pour la consommation de cette masse sera :

$$t_{\text{heures}} = m / k$$

donc le taux de défaillance de ce composant est :

$$\lambda_{(\text{déf/h})} = 1 / t = k / m \quad (3.1)$$

De cette équation, on peut voir que le temps de défaillance dépend de la valeur de  $k$  et la température peut bien changer la valeur du paramètre  $k$  et par la suite changer le taux de défaillance.

La masse  $m$  peut être connue, et le taux  $k$  peut être estimé par l'équation suivante [1] :

$$K = a * T_{AV} * e^{(-b/T)} \quad (3.2)$$

avec :

a, b : constantes

T : température réelle

T<sub>AV</sub> : température moyenne de réaction

Notons que lors de l'analyse des effets de la température sur le taux de défaillance il faut tenir compte de l'augmentation de la température interne des composants dissipant de la chaleur en utilisant en général l'équation suivante [3] :

$$T_j = T_c + \theta_{jc} * P \quad (3.3)$$

T<sub>j</sub> : température de jonction

P : puissance dissipée dans le circuit

θ : résistance thermique entre les jonctions et le boîtier

Pour les semi-conducteurs discrets ou Pour les microcircuits (voir chapitre 4)

T<sub>c</sub> : température du boîtier.

Les effets d'une température élevée de l'environnement sur les composants sont : les défaillances catalectiques, les changements temporaires ou permanents des valeurs. Généralement la cause de ces effets est le changement de l'orientation des molécules du matériel respectif, ce qui conduit à l'altération des propriétés électriques. L'augmentation de la température augmente le taux des changements de nature physique ou chimique du matériel concerné. C'est pour cela que toute amélioration de la fiabilité est liée étroitement au développement des nouveaux matériaux plus stables et plus inertes.

### 3.2.2 Température basse

Comme on l'a déjà mentionné, les équipements électroniques sont les plus sensibles aux effets de température. En effet, aux basses températures à partir

d'approximativement  $-40^{\circ}\text{C}$ , on doit s'attendre à des changements concernant leurs performances. Cela est dû en général aux coefficients de température des divers composants (condensateur, résistances, inductances,... Etc.). Le vent et la neige associés aux basses températures posent de grands problèmes aux antennes, aux câbles, etc., sans parler des problèmes de maintenance de ces équipements (la tempête du verglas au Québec en 98 est un bon exemple).

L'expérience montre que certains composants cessent même de fonctionner au-delà de  $-40^{\circ}\text{C}$  (le quartz, les condensateurs électrolytes,... Etc.) Tandis que d'autres se fondent ou deviennent friables, la capacité des condensateurs normaux diminue et l'activité des batteries sèches est sérieusement réduite. Les composantes mécaniques (interrupteurs, commutateurs, potentiomètre, socle, fiches, etc.) se contractent et produisent un mauvais contact ; la capacité des condensateurs au papier et au papier métallisé diminue d'au moins 10% tandis que la capacité des condensateurs mica augmente d'environ (50-300) % en fonction des dimensions.

### **3.2.3 Contamination atmosphérique**

Le sable, la poussière et le sel sont les principales contraintes de contamination qui peuvent affecter le comportement des équipements et influencent leurs rendements. Notons qu'aucun métal n'est doué d'immunité contre les effets du sel contenu dans l'air et que ce sel contenu par l'atmosphère peut largement accélérer les phénomènes de corrosion. Le contact entre deux métaux en présence du sel et de l'humidité engendre la corrosion galvanique qui représente un des plus sérieux problèmes, la poussière et les fines particules de sable en présence de l'humidité élevée provoquent le court-circuit et le mauvais fonctionnement.

### 3.2.4 Humidité

Sur le globe terrestre, l'humidité absolue varie entre  $0,1 \text{ g/m}^3$  dans les régions polaires et  $27 \text{ g/m}^3$  dans les régions équatoriales. La température et l'humidité conduisent à des taux de défaillance très élevés par rapport à n'importe quel autre environnement. L'humidité peut influencer la fiabilité des équipements ou des composants par :

- formation d'une pellicule fine de liquide
- pénétration de la vapeur à l'intérieur des dispositifs
- absorption d'énergie électromagnétique (si elle est présente) par la vapeur qui se traduit par un effet de charge pour les éléments inductifs (électroniques)
- L'humidité provoque essentiellement des défaillances par création de courants de fuite ou court-circuit et par corrosion, car la vapeur contient toujours des mélanges corrosifs.

Les impuretés de n'importe quelle surface provoquent rapidement l'ionisation de la pellicule de liquide et cette dernière devient conductrice ; ceci se traduit dans le langage électrique par des changements de la résistance d'isolement, de la résistivité de surface, de la capacité, de facteur de dissipation. La constante diélectrique d'un matériel humide augmente et dépend de la température.

Quant à l'effet secondaire qui est la corrosion, on distingue surtout deux mécanismes différents :

- 1) La corrosion galvanique, provoquée par la mise en présence de deux métaux différents tel l'aluminium et l'or dans le cas des microcircuits dans un électrolyte ; ceci conduit à la création d'une pile électrolytique. La réaction anodique de corrosion affecte l'électrode où se forment des ions. Afin de prévenir ce type de corrosion, on doit bien choisir les



métaux afin d'éviter une haute différence de potentiel entre les matériaux se trouvant soit en contact direct soit par liaisons d'humidité.

2) La corrosion électrolytique, qui requiert une polarisation extérieure.

### 3.2.5 Facteurs climatiques et géographiques

du point de vue fiabilité, on distingue cinq catégories de climats sur terre :

- 1- Tropical (chaud et humide) ;
- 2- Désertique (aride) ;
- 3- Polaire ;
- 4- Maritime(corrosif) ;
- 5- Haute altitude.

Les contraintes climatiques les plus dures sont rencontrées par les avions stratosphériques, par les fusées intercontinentales et interplanétaires, par les véhicules spatiaux, etc. Cela explique pourquoi les composants et les équipements utilisés à bord de ces véhicules doivent avoir une très haute fiabilité. Les conditions désertiques rencontrées dans des endroits, comme (l'Arabie Saoudite, l'Iran, le sud de l'Algérie,... Etc.), rendent plus difficiles les problèmes de dissipation des équipements électroniques. En plus la variation de température de (+50°C ... +60°C) à (-5°C ...-10°C) accompagnée par des dilatations et contractions des différents matériaux peut conduire à des défaillances mécaniques des composants. C'est pour cela, il est recommandé d'utiliser des "burn-in" (ou d'un test équivalent) pour tous les composants qui doivent fonctionner dans un climat si dur.

### 3.2.6 Vibrations et chocs

Les vibrations et les chocs provoquent des défaillances et endommagent l'équipement ou le composant, même si les forces inertes sont petites (25g dans le cas de vibrations, par rapport à 300 g dans le cas de choc mécanique) ; Cela s'explique par la nature répétitive des vibrations.

### 3.2.7 Micro-organismes

Les micro-organismes, favorisés par une chaleur humide constituent un autre facteur qui peut endommager sérieusement les équipements électroniques et électromécaniques qui opèrent dans ce milieu. Le moyen le plus efficace est l'utilisation à des périodes régulières des produits chimiques conçus spécialement pour ces fins.

### 3.2.8 Les rayonnements nucléaires

#### Les radiations ionisantes :

les équipements soumis à des rayonnements nucléaires et spécialement les équipements électroniques sont susceptibles à des défaillances. Cela s'explique par le fait que les matériaux semi-conducteurs et les matériaux organiques se dégradent d'une manière appréciable s'ils sont irradiés avec des neutrons. Les rayons gamma affectent les jonctions pn. Dans le cas des circuits hybrides, les impulsions thermiques produites par détonations nucléaires conduisent au dépassement des spécifications imposées à ces circuits. D'après les normes actuelles, on ne peut pas dépasser les niveaux de rayonnements suivants :

#### Radiation ionisante :

$10^{13}$  neutrons /  $\text{cm}^2$  ;

$10^{18}$  rads(Si)/s [radiation gamma]

$10^3$  rads [dose totale]

#### Impulsions électromagnétiques :

$10^4$  V/m niveau maximum ;

100 Ampères. spires /m [champ magnétique].

Au-delà de ces spécifications, on constate habituellement soit des destructions permanentes des dispositifs soit une interruption de fonctionnement pendant des courtes périodes de temps.

Les radiations affectent plus les matériaux organiques, utilisés comme isolants ou diélectriques. Sur les matériaux inorganiques, les radiations peuvent changer leurs structures moléculaires ou atomiques.

### 3.3 Conclusion

On peut constater que la fréquence de défaillance par usure est strictement fonction de l'âge du composant seulement, par contre pour les défaillances par détérioration, il est possible de repousser leur apparition en jouant sur la conception des éléments du composant pour élargir ses tolérances, tout en conservant exactement les mêmes contraintes de fonctionnement.

De plus, on n'a pas encore des lois exactes et générales des paramètres de fiabilité en fonction de niveau de contrainte (d'ailleurs, c'est le but même de notre travail) ; la meilleure estimation se fonde sur les statistiques pour des niveaux différents.

On peut remarquer aussi, qu'un fonctionnement sous contraintes réduites repousse la détérioration et retarde l'apparition des défaillances d'usures et qu'une réduction des contraintes, allonge la vie moyenne et en diminue la variance.

## CHAPITRE IV

### PRÉVISION DE LA FIABILITÉ

#### 4.1 Mode de défaillance

Il y a deux types de défaillance, les défaillances catalectiques (complètes, soudaines, à taux de défaillance souvent constant) et les défaillances de dérive (usure, fatigue), qui provoquent des baisses de performance. Donc la fiabilité intrinsèque  $R_i$  d'un composant, est définie comme le produit de la fiabilité  $R_C$  (défaillances catalectiques) par la fiabilité  $R_D$  (défaillances de dérive).

##### 4.1.1 Défaillance catalectique

Les défaillances catalectiques sont généralement caractérisées par un taux de défaillance constant. Cela ne s'applique pas aux défaillances mécaniques à rupture par fatigue, qui sont d'origine catalectiques mais ne sont pas à taux de défaillance constants et doivent être traitées comme des défaillances de dérive. En général, le taux de défaillance catalectique d'un composant dépend de son type, des contraintes appliquées (température, tension électrique... Etc.), de son environnement (humidité, chocs, vibrations...Etc.), du niveau de qualité de sa fabrication. Pour effectuer une prévision dans un système, on doit dresser une liste (nomenclature de fiabilité) des composants, cette liste doit être distincte de la nomenclature de fabrication et doit comporter les informations suivantes :

- 1 - Type de composant
- 2 - Classe de sûreté

- 3 - Environnement
- 4 - Contraintes appliquées
- 5 - Niveau de qualité de fabrication
- 6 - Nombre de composants de ce type utilisés dans les conditions indiquées.

Il existe des bases de données assez complètes permettant, à partir de ces informations, d'évaluer le taux de défaillance de ces composants dans ces conditions d'emplois. Parmi ces derniers on cite, le standard de l'administration militaire américain MIL-HDBK-217 version D ou F et le recueil de données de fiabilité du Centre National d'Étude des Télécommunications (CNET).

#### **4.1.2 Défaillance de dérive**

Le paramètre utile d'un type de composant (gain de transistor, résistance d'une pièce mécanique,...Etc.) est caractérisé par une distribution de probabilité dont les paramètres (par exemple moyenne et écart type) varient avec l'âge. La contrainte à supporter (puissance de sortie d'un amplificateur, contrainte mécanique sur une pièce) est soit constante, soit caractérisée par une distribution de probabilité. Pour chaque âge, on calculera la probabilité que la contrainte soit inférieure à la résistance.

Cette probabilité est la fiabilité du composant à cet âge en utilisant la loi de distribution normale. Dans les cas les plus complexes on utilisera la méthode des moments lorsque les distributions statistiques des paramètres suivent des lois normales ou y peuvent y être ramenées, ou la méthode de simulation de monte-carlo si l'on ne dispose que de distributions empiriques (ou si les distributions des paramètres sont complexes).

Comme on l'a vu précédemment, la fréquence de défaillances dans le temps des équipements électroniques est différente de celle des équipements

mécaniques , en plus pour les calculs de fiabilité on suppose toujours que le taux de défaillances des équipements électroniques est constant, ce qui n'est pas le cas pour les équipements mécaniques. La fiabilité des équipements (quoi que se soit leurs natures), qui opèrent ou fonctionnent dans un milieu nucléaire, nécessitent des calculs spéciaux qui tiennent compte de plusieurs facteurs supplémentaires et des règlements de normalisation mondiale.

Dans la section qui va suivre, on essaye de raffiner et de clarifier les méthodes utilisées présentement dans le monde, pour ajuster les taux de défaillance des équipements afin de les rapprocher des données d'exploitation (données réelles) qui sont généralement différentes de celles obtenues dans les laboratoires lors des essais. La cause principale, est que les conditions du milieu dans lequel ces équipements fonctionnent ne sont pas les mêmes que celles utilisées dans le laboratoire.

## **4.2 Ajustement des taux de défaillance des équipements électroniques**

Pour les équipements électroniques, les meilleures références, sont comme on l'avait mentionné, le standard militaire américain MIL-HDK-217-F et le CNET en France, sans oublier le nouveau standard de Bellcor. Leurs approches sont presque similaires, ils sont destinés aux équipements électroniques et leurs données ne s'appliquent pas souvent dans le domaine nucléaire.

L'ajustement des taux de défaillance et la prévision de la fiabilité des équipements électroniques est basée essentiellement sur la nomenclature citée dans la section 4.1.1, (défaillance catalectique).

Le MIL-HDK-217 était la norme initiale pour la fiabilité, il a été conçu pour fournir des modèles mathématiques de fiabilité pour presque chaque type imaginable de dispositif électronique. Il est utilisé comme référence de fiabilité pour l'industrie militaires et civile et sa réputation est reconnue mondialement. La dernière version de MIL-HDK-217, révision F, notification 2, du mois de février 1995.

Le MIL-HDK-217 inclus deux méthodes de prévision de fiabilité : " part Count Method " et " Part Stress Analysis " . Ces deux méthodes se distinguent par le degré d'informations ou de données requises pour leurs applications . "Part Count Method" nécessite moins d'informations, elle est généralement utilisée dans les phases préliminaires du design dans le but d'évaluer grossièrement la fiabilité, lorsque les informations détaillées sur l'équipement ne sont pas encore disponibles . Cette méthode utilise des modèles mathématiques simples. Par contre la deuxième méthode, "Part Stress Analysis" demande un niveau avancé de détail et beaucoup d'informations , elle est appliquée une fois que le design de l'équipement est achevé et qu'on peut dresser une liste de tous les composants et identifier les facteurs causant le stress.

Le model de prévision Bellcor a été initialement développé par les laboratoires d'AT&T et Bell, les laboratoires de Bell ont modifié les équations de MIL-HDK-217 pour mieux représenter leurs équipements en exploitation. Bellcor et MIL-HDK-217 étaient très semblables, mais Bellcor a ajouté d'autres modèles qui tiennent compte par exemple du "burn-in", et des essais en laboratoire. Ces modules ajoutés ont rendu la norme Bellcor populaire auprès des organismes commerciaux. La révision la plus récente du procédé de prévision de Bellcor est TR-332, version 6, décembre 1997 dont les calculs se réfèrent à dix méthodes différentes.

Chacune de ces méthodes est conçue pour tenir compte d'une information différente. Cette information peut inclure des données de stress et des données de "burn-in".

Pour notre recherche bibliographique, on s'est intéressé uniquement à la méthode "Part Stress Analysis Prediction", et cela est justifié par le fait que les équipements utilisés à G2 sont actuellement en exploitation, et les données requises ou nécessaires sont disponibles. (à noter que le groupe fiabilité à G2, est entrain de finaliser le développement d'une base de donnée des équipements, assez complète).

La méthode appelée l'analyse du stress des composants ou "Part Stress Analysis Prediction", permet d'évaluer et d'ajuster les taux de défaillances de l'ensemble des composants électroniques en fonction de leur complexité, de la technologie employée et de l'environnement dans lequel le système est utilisé. Les modèles des taux de défaillance sont établis pour la plupart des composants utilisés dans les équipements électroniques.

Ces composants sont regroupés dans les catégories suivantes\* :

- 10- Microcircuit
- 11- Semi-conducteur
- 12- Tubes
- 13- Laser
- 14- Résistances
- 15- Condensateurs
- 16- Composantes inductives
- 17- Composantes rotatives
- 18- Relais
- 19- Interrupteurs
- 20- Connecteurs
- 21- Interconnexion et assemblage
- 22- Connections
- 23- Autres composants.

Chaque catégorie nommée ci-dessus est régie par un modèle spécifique, qui tient compte des variables affectant son taux de défaillance et permet son ajustement. Le tableau 4.1, résume les facteurs de type  $\pi$  et leurs descriptions pour les modèles de taux de défaillance à l'exception des micro-électroniques

---

\* Reliability Prediction of Electronic equipment MIL-HDK-217D, US.Department of defense, 1991



Tableau 4.1

**Facteurs d'ajustements des taux de défaillances en fonction des composantes <sup>(1)</sup>**

<b>Facteur</b>	<b>Description</b>
<b>Facteurs communs utilisés dans la majorité des catégories</b>	
$\pi_E$	Environnement : tient compte de l'influence des facteurs environnementaux autre que la température, et qui dépend de la catégorie de l'application
<b>Diodes</b>	
$\pi_Q$	Qualité : tient compte des effets de différents niveaux de qualité.
$\pi_T$	Température: tient compte du facteur de dissipation de la chaleur.
$\pi_{S2}$	Stress du voltage: ajuste les modèles pour le stress électrique, à l'addition de l'effet de la puissance inclus dans $\lambda_h$ .
$\pi_C$	Contact : facteur qui tient compte du type de construction du contact
<b>Résistance</b>	
$\pi_T$	Température: tient compte du facteur de l'augmentation de la chaleur.
$\pi_{S2}$	Puissance : tient compte de dissipation de la puissance

<sup>(1)</sup> Reliability Prediction of Electronic equipment MIL-HDK-217D, US.Department of defense, 1991

Tableau 4.1 ( suite)

Facteur	Description
<b>Condensateurs</b>	
$\pi_T$	Température: tient compte de l'augmentation de la température.
$\pi_{SR}$	Résistance : tient compte de la résistance de série
$\pi_V$	Voltage : tient compte du stress du voltage
$\pi_C$	Capacité : tient compte de la valeur du condensateur
<b>Composants inductifs</b>	
$\pi_T$	Température: tient compte de l'augmentation de la température.
$\pi_k$	Cycle : tient compte de la fréquence de branchement et de débranchement
<b>Interconnections</b>	
$\pi_C$	Facteur de complexité : tient compte du nombre de couches du circuit
<b>Relais</b>	
$\pi_L$	Facteur de charge : tient compte du type de charge
$\pi_C$	Facteur de forme : tient compte du type de la forme du contact

Tableau 4.1 (suite)

Facteur	Description
<b>Relais ( suite)</b>	
$\pi_{CYC}$	Facteur du cycle : tient compte du nombre de cycles
$\pi_F$	Facteur d'application et de construction : tient compte du type d'application et du type de construction
<b>Microprocesseurs</b>	
$\pi_L$	Facteur d'apprentissage ou de maturité : tient compte du nombre d'années de production
$C_1$	Facteur de la complexité de la matrice
$C_2$	Taux de défaillance de l'emballage
$\pi_T$	Température : tient compte de l'augmentation de la température
<b>Microcircuits hybrides</b>	
$\lambda_c$	Taux de défaillance de chaque type de composant
$\pi_L$	Facteur d'apprentissage ou de maturité : tient compte du nombre d'années de production
$\pi_F$	Facteur de fonction : tient compte de la fonction du circuit

## 4.2.1 Semi-conducteurs discrets :

### 4.2.1.1 Diodes, basse fréquence :

Le modèle général du taux de défaillance des diodes et transistors est

$$\lambda_p = \lambda_h * \pi_T * \pi_S * \pi_C * \pi_Q * \pi_E \quad \text{défaillances/10<sup>6</sup> heures} \quad (4.1)$$

où

$\lambda_p$  : taux de défaillance du composant

$\lambda_h$  : taux de défaillance de base

la valeur de  $\lambda_h$  est déterminée en fonction du type de la diode et de l'application.

$\pi_T$  : Facteur de température, est obtenu par l'équation suivante :

$$\pi_T = \exp \left( - 3091 \left( \frac{1}{T_j + 273} - \frac{1}{298} \right) \right) \quad (4.2)$$

avec

$T_j$  : température de jonction en °C

$\pi_S$  : Facteur du stress électrique est égal à :

$$\pi_S = 0.054 \quad V_S \leq 0.3$$

$$\pi_S = V_S^{2.43} \quad 0.3 < V_S < 1$$

avec  $V_S$  = Voltage appliqué / Voltage nominale

$\pi_C$  : facteur de construction

$\pi_Q$  : facteur de qualité

$\pi_E$  : facteur d'environnement

#### 4.2.1.2 Résistances

##### Résistance fixe (Type fixed, film, insulated)

le modèle général du taux de défaillance se représente par l'équation :

$$\lambda_p = \lambda_b (\pi_T * \pi_p * \pi_s * \lambda_Q * \lambda_E) \quad \text{défaillances/10}^6 \text{ heures} \quad (4.3)$$

avec :

$\pi_b$  : Taux de défaillance de base

$\pi$  : Facteur de température

$\pi_p$  : Facteur de dissipation

$\pi_s$  : Facteur de du stress de la puissance

$\pi_E$  : Facteur d'environnement

$\pi_Q$  : Facteur de qualité

#### 4.2.1.3 Condensateurs

Le modèle général du taux de défaillance est:

$$\lambda_p = \lambda_b (\pi_T * \pi_C * \pi_V * \pi_{SR} * \pi_Q * \pi_E) \text{ défaillances / } 10^6 \text{ heures} \quad (4.4)$$

où

$\pi_b$  : Taux de défaillance de base

$\pi_T$  : Facteur de température

$\pi_C$  : Facteur de capacité

$\pi_{SR}$  : Facteur de résistance de série

$\pi_E$  : Facteur d'environnement

$\pi_Q$  : Facteur de qualité

#### 4.2.1.4 Transformateurs :

Le modèle général du taux de défaillance est :

$$\lambda_p = \lambda_b(\pi_E * \pi_T) \text{ défaillances / } 10^6 \text{ heures} \quad (4.5)$$

$$\pi_T = \exp\left(\frac{-11}{8.617 * 10^{-5}} \left(\frac{1}{T_{HS} + 273} - \frac{1}{298}\right)\right)$$

avec

$$T_{HS} = T_A + 1.1 * (\Delta T)$$

$T_A$  : Température ambiante en °C

$\Delta T$  : Augmentation moyenne de la température par rapport à  $T_A$

$\pi_E$  : Facteur d'environnement

$\lambda_b$  : Taux de défaillance de base

#### 4.2.1.5 Connecteurs

Le modèle général du taux de défaillance est :

$$\lambda_p = \lambda_b * \pi_K * \pi_T * \pi_E * \pi_Q \quad (4.6)$$

avec :

$\lambda_b$  : taux de défaillance de base

$\pi_K$  : facteur de connexion \ déconnexion

$\pi_T$  : facteur de température

$\pi_E$  : facteur d'environnement

$\pi_Q$  : facteur de qualité

N : nombre de contacts actifs.

$\pi_E$  : facteur d'environnement

### **Connecteurs ( Integrated circuit sockets)**

le modèle général du taux de défaillance est :

$$\lambda_p = \lambda_h * \pi_p * \pi_Q * \pi_E \quad (4.7)$$

avec :

$\lambda_h$  : taux de défaillance de base

$\pi_p$  : Facteur des contacts actives, obtenu par l'équation :

$$\pi_p = \exp\left(\frac{N-1}{10}\right)^q$$

q = 0.39

N : nombre de contacts actifs.

$\pi_E$  : Facteur d'environnement

$\pi_Q$  : Facteur de qualité

#### **4.2.1.6 Connections**

##### **A) Connections aux circuits imprimées (Interconnection assembly with plated trough holes)**

Le modèle général du taux de défaillance est :

$$\lambda_p = \lambda_h [N_1 * \pi_C + N_2 * (\pi_C + 13)] * \pi_Q * \pi_E \quad (4.8)$$

avec :

$\lambda_h$  : taux de défaillance de base .

$N_1$  : nombre de contacts fonctionnels soudés par vague d'étain

$N_2$  : nombre de contacts fonctionnels soudés manuellement

$\pi_C$  : Facteur de complexité

$\pi_E$  : Facteur d'environnement

$\pi_Q$  : Facteur de qualité

### B) Connections utilisées pour tout autre assemblage

Le modèle général du taux de défaillance est :

$$\lambda_p = \lambda_h * \pi_E \quad (4.9)$$

où

$\lambda_h$  : Taux de défaillance de base

$\pi_E$  : Facteur d'environnement

### C) Connections technologie de montage en surface

Le modèle général du taux de défaillance est donné par l'équation suivante :

$$\lambda_{SMT} = \frac{ECF}{\alpha_{SMT}}$$

où

ECF : nombre de défaillance effective déduite du tableau 4.2 suivant:

**Tableau 4.2.**  
**Valeur de ECF<sup>(\*)</sup>**

<u>LC</u>	ECF
0-0.1	0.03
0.11-2.0	0.15
0.21-0.30	0.23
0.31-0.40	0.31
0.41-0.50	0.41
0.51-0.60	0.51
0.61-0.70	0.61
0.71-0.80	0.68
0.81-0.90	0.76
>0.90	1.0

<sup>(\*)</sup> Reliability Prediction of Electronic Equipment MIL\_HDBK-217F, US.Department of Defense, 1991



LC : cycle de vie de l'équipement dans lequel le circuit opère.

$$\alpha_{SMF} = \frac{NF}{CR}$$

CR : taux de cycle de la température, ce taux est basé sur une analyse thermique du circuit.

NF : nombre moyen de cycles thermiques avant défaillance avec :

$$NF = 3.5 * \left( \frac{d}{0.65h} \left( \alpha_s * \Delta T - \alpha_{cc} (\Delta T + T_{RISE}) \right) * 10^{-6} \right)^{-2.26} * (\pi_{LC})$$

où

d : distance du centre du composant au plus loin joint de soudure en millième de pouce

h : hauteur du joint de soudure en millième de pouce pour les composants sans pattes, pour tout autre composant on prend h=8

$\alpha_s$  : coefficient d'expansion thermique de la carte

$\Delta T$  : différence de températures extrêmes de l'environnement

$\alpha_{cc}$  : coefficient d'expansion thermique du matériel de l'emballage

$T_{RISE}$  : augmentation de la température due à la dissipation de la puissance  $P_d$

$\pi_{LC}$  : facteur de configuration des pattes

#### 4.2.1.7 Cristal Quartz

Le modèle général du taux de défaillance est

$$\lambda_p = \lambda_h * \pi_Q * \pi_E \quad (4.10)$$

avec

$$\lambda_h = 0.0013(f)^{0.23}$$

$\pi_E$  : facteur d'environnement

$\pi_Q$  : facteur de qualité

#### 4.2.1.8 Relais :

##### A) Relais mécanique

Le modèle général du taux de défaillance est :

$$\lambda_p = \lambda_h (\pi_E * \pi_L * \pi_C * \pi_{CYC} * \pi_F * \pi_Q)_{\text{défaillance}/10^6 \text{ h}} \quad (4.11)$$

Si la température maximale de fonctionnement est inférieure à 85°,  $\lambda_h$  est donnée par l'équation suivante :

$$\lambda_h = 0.00555 * \exp\left(\frac{T_A + 273}{352}\right)^{15.7} \quad (4.12)$$

si la température maximale de fonctionnement est inférieure à 125°C,  $\lambda_h$  est donnée par l'équation suivante :

$$\lambda_h = 0.0054 * \exp\left(\frac{T_A + 273}{377}\right)^{10.4} \quad (4.13)$$

avec

$\pi_L$  : facteur de la charge est donné par l'une de ces trois équations en fonction du type de la charge (tableau 4.3)

$\pi_c$  : Facteur de forme de contact

$\pi_{CYC}$  : Facteur de cycle

$\pi_f$  : Facteur d'application et de construction

$\pi_E$  : Facteur d'environnement

$\pi_Q$  : Facteur de qualité

**Tableau 4.3.**  
**Facteur de charge en fonction du type de charge<sup>(\*)</sup>**

	TYPE DE CHARGE		
	RESISTIVE	INDUCTIVE	LAMP
$\pi_L$	$\exp\left(\frac{S}{0.8}\right)^2$	$\exp\left(\frac{S}{0.4}\right)^2$	$\exp\left(\frac{S}{0.2}\right)^2$

où 
$$S = \frac{\text{charge du courant d'opération}}{\text{charge du courant nominal}}$$

**B) Relais type "solide state" et "time delay" :**

Le modèle général du taux de défaillance est :

$$\lambda_p = \lambda_h * \pi_Q * \pi_E \quad (4.14)$$

avec

$\lambda_h$  : Taux de défaillance de base

$\pi_E$  : Facteur d'environnement

$\pi_Q$  : Facteur de qualité

---

<sup>(\*)</sup> Reliability Prediction of Electronic Equipment MIL\_HDBK-217F, US.Department of Defense, 1991

#### 4.2.2 Composants micro-électroniques

Les grandes classes des composants micro-électroniques répertoriées dans le MIL-HDBK -217F NOTICE 2 sont :

- Bipolaire monolithique digitale et linéaire (circuit à matrices de portes logiques)
- Monolithique MOS digitale et linéaire (circuit à matrices de portes logiques)
- Bipolaire monolithique et microprocesseur digital MOS
- Bipolaire monolithique et mémoires MOS
- "GaAs" digitale monolithique
- "GaAs" MMIC monolithique
- "Microcircuits hybrides"
- "Surface acoustics wave devices"
- "Magnetic bubble memories"

Dans cette classification chaque bipolaire monolithique représente tous les composants TTL, ASTTL, DTL, ECL, CML, ALSTTL, HTTL, FTTL, F, LTTL, STTTL, BICMOS, LSTTL, IIL, PL ET ISL.

Les MOS représentent tous les microcircuits métal-oxyde incluant les NMOS, PMOS, CMOS, ET LES MNOS. Une distinction entre les modèles est établie en fonction du niveau de la complexité. Un composant qui comporte jusqu'à 100 entrées est assigné à la classe SSI/MSI, (Small / Medium Scale Integration). Le composant qui comporte plus que 100 entrées est un composant de type LSI (large Scale Integration).

Les fonctions AND, OR, exclusive OR, NAND, NOR et les inverseurs constituent les portes. Si le diagramme logique n'est pas disponible, on

détermine le nombre de portes en fonction du nombre de transistors à l'aide du tableau 4.4.

**Tableau 4.4.**  
**Détermination du nombre de portes en fonction du nombre des transistors<sup>(\*)</sup>**

Technologie	Nombre approximatif de portes
Bipolaire	Nombre de transistors/3.0
CMOS	Nombre de transistors/4.0
MOS	Nombre de transistors/3.0

#### 4.2.2.1 Microcircuits

La catégorie des microcircuits comprend :

- "Bipolar devices and linear gate/logic arrays"
- "MOS devices, digital and linear gate/logic arrays"
- "Field programmable Logic array (PLA) and Programmable Array Logic (PAL)"
- Microprocessors"

Le modèle général du taux de défaillance des microcircuits est :

$$\lambda_p = \pi_l * \pi_Q [C_1 * \pi_T * C_2 * \pi_e] \text{défaillances}/10^6 \text{ heures} \quad (4.15)$$

où :

$\lambda_p$  : taux de défaillance du composant

---

<sup>(\*)</sup> Reliability Prediction of Electronic Equipment MIL\_HDBK-217F, US.Department of Defense, 1991

$\pi_Q$  : facteur de qualité

$\pi_T$  : facteur de température

$\pi_E$  : facteur d'environnement

$\pi_L$  : facteur d'apprentissage

$C_1$  : facteur de complexité de la matrice

$C_2$  : facteur de la cadence de défaillance pour tous les microcircuits

#### 4.2.2.2 Microcircuit hybride :

Le taux de défaillance du modèle hybride est :

$$\lambda_p = \left[ \sum N_c \lambda_c \right] (1 + 0.2) * \pi_F * \pi_Q * \pi_L \quad (4.16)$$

où :

$N_C$  : nombre de chaque composant particulier

$\lambda_C$  : taux de défaillance du composant

$\pi_E$  : facteur d'environnement

$\pi_Q$  : facteur de qualité

$\pi_L$  : facteur de densité

$\pi_F$  : facteur de fonction du circuit

### 4.3 Ajustement des taux de défaillance des équipements mécaniques

Il est reconnu aujourd'hui que la fiabilité des équipements mécaniques est un facteur vital dans le développement, la production, l'opération et la maintenance des systèmes complexes. La référence la plus utilisée pour ajuster les taux de défaillance des équipements mécaniques, est le manuel des procédures de la prévision de la fiabilité pour les équipements mécaniques « The Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment (NSWC-94/L07) ». Ce manuel a été développé par la marine américaine, il fournit des modèles d'ajustements des taux de défaillance, pour différents types de dispositifs mécaniques, comprenant des ressorts, des roulements, des joints, des moteurs, des freins, et des embrayages. C'est

une norme relativement nouvelle, et actuellement, la seule de son genre. Cette référence est utilisée essentiellement dans la phase de design. Elle permet à partir de ses modèles, une analyse de conception pour identifier les modes de défaillance critiques, les causes de la non fiabilité des équipements mécaniques et fournir un outil pertinent pour prévoir le comportement de l'équipement afin de choisir la logistique appropriée qui assure son bon fonctionnement lorsqu'il sera opérationnel dans un environnement réel.

Malgré la rigueur et la clarté du (NSWC-94/L07), Le niveau poussé d'information requise, limite son utilisation, vu que les détails exigés ne sont pas toujours spécifiés sur les manuels d'utilisation et sur les fiches techniques qui accompagnent souvent les équipements.

#### **4.4 Études faites à G2**

Plusieurs études de fiabilité, faites par l'unité analyse et fiabilité de la centrale nucléaire de GENTILLY-II ou bien par des consultants externes ont conclu souvent que les défaillances constatées sur les équipements sont généralement dues à des causes classiques (utilisation inadéquate, dégradations, usure ...Etc.), sans pour autant mentionner l'influence de l'environnement dans lequel l'équipement est utilisé comme exemple, on peut citer l'étude sur la fiabilité des joints d'étanchéité pour les portes des SAS. Ces joints ont été changés suite à leur dégradation. Cette étude a conclu que la cause de la dégradation peut être bien dû à la fréquence d'utilisation de ces portes. Cela peut être vrai, mais on peut émettre aussi l'hypothèse que la dégradation est due à une partie ou au total à l'influence des conditions atmosphériques hostiles. Notons qu'un rapport d'évaluation de ces dégradations, émis auparavant par la commission de contrôle de l'énergie atomique (CCEA), a mentionné clairement la probabilité que ces dégradations soient causées par l'environnement.

## 4.5 Conclusion

Les deux modèles d'ajustement des taux de défaillance des équipements électroniques et mécaniques, cités précédemment peuvent être considérés comme un guide pour les études de fiabilité.

Le niveau d'information parfois très exigeant, requis pour leurs utilisations, nécessite des détails difficiles à obtenir. Cela peut restreindre leurs domaines d'application.



## CHAPITRE V

### DESCRIPTION DU SYSTÈME À L'ÉTUDE

#### 5.1 Description de la simplification du système à l'étude

Le SAU#2 de la centrale nucléaire CANDU 600, a pour fonction principale, l'arrêt du réacteur, le système fait appel à l'injection de poison neutronique dans le modérateur. L'injection de poison provoque l'arrêt instantané du réacteur. La figure 5-1 illustre l'emplacement et le principe de l'injection de poison du SAU#2.

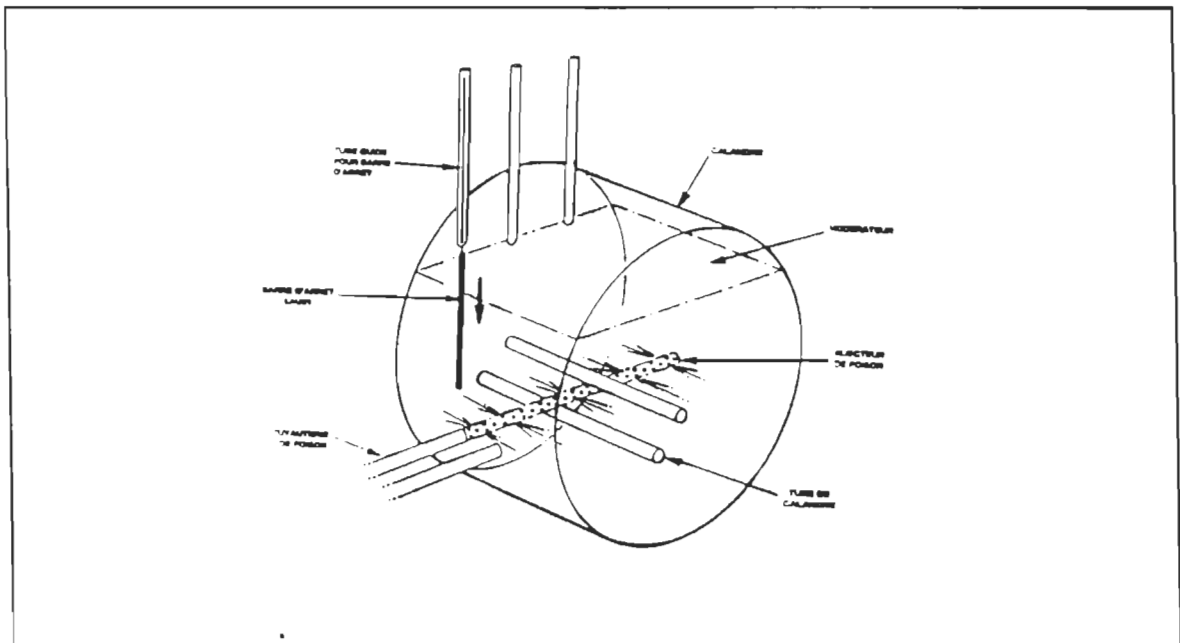


Figure 5.1 Principe d'injection de poison

Le système d'arrêt d'urgence est constitué de six (6) circuits d'injection identiques, La figure 5-2 illustre le fonctionnement du système.

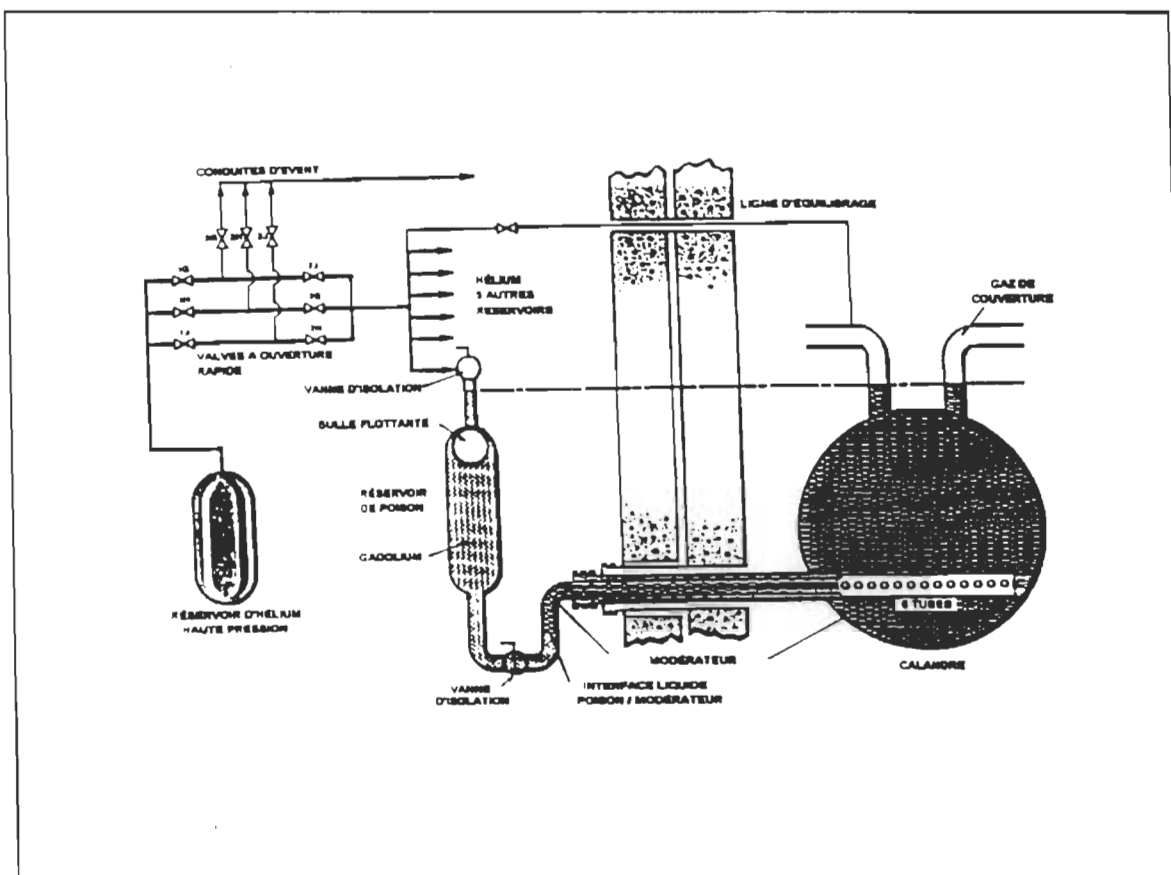


Figure 5.2 Fonctionnement du système

Le système comprend un réservoir d'hélium à haute pression, des vannes à ouverture rapide, six réservoirs et injecteurs. Lorsque le système est en attente, les vannes à ouverture rapide sont fermées (les vannes d'évent aussi). Le réservoir de poison est en équilibre avec le modérateur. À cause de la densité du modérateur et du poison, ces deux (2) fluides sont en contact (bas de la figure). Ce point de contact s'appelle l'interface liquide.

Lorsque le système est sollicité, les vannes à ouverture rapide s'ouvrent, ce qui permet à l'hélium sous pression de pousser le poison. Celui-ci se déplace vers le bas et se dirige vers l'injecteur. Le temps requis pour arrêter le réacteur par SAU#2 est de deux (2) secondes.

Un des aspects importants des systèmes spéciaux de sûreté consiste en l'utilisation d'un arrangement particulier pour que le système soit sollicité. Cet arrangement porte le nom de "logique 2 de 3" (ou logique 2/3).

La figure 5-3 illustre les vannes (**sujet à l'étude**) à ouverture rapide du SAU#2.

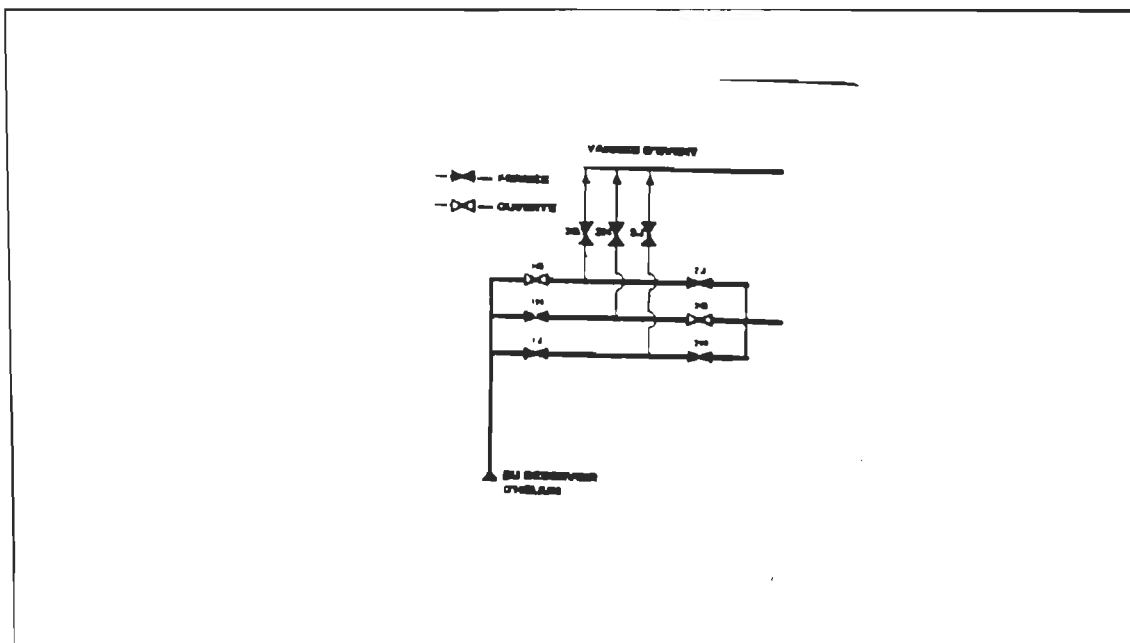


Figure 5.3 Vannes à ouverture rapide

Le principe est le suivant :

Chaque paramètre de déclenchement (ex : puissance neutronique élevée) doit être lu par au moins 2 de 3 détecteurs identiques pour provoquer le fonctionnement du système. Ces détecteurs portent des lettres pour les identifier ; G, H, J pour SAU#2. Ces lettres correspondent à une "chaîne de déclenchement".

La figure 5-4 montre le système avec les vannes de la série G actionnées, ce qui correspond à 1 lecture de 3 reçue par le système. Celui-ci ne se déclenche pas.

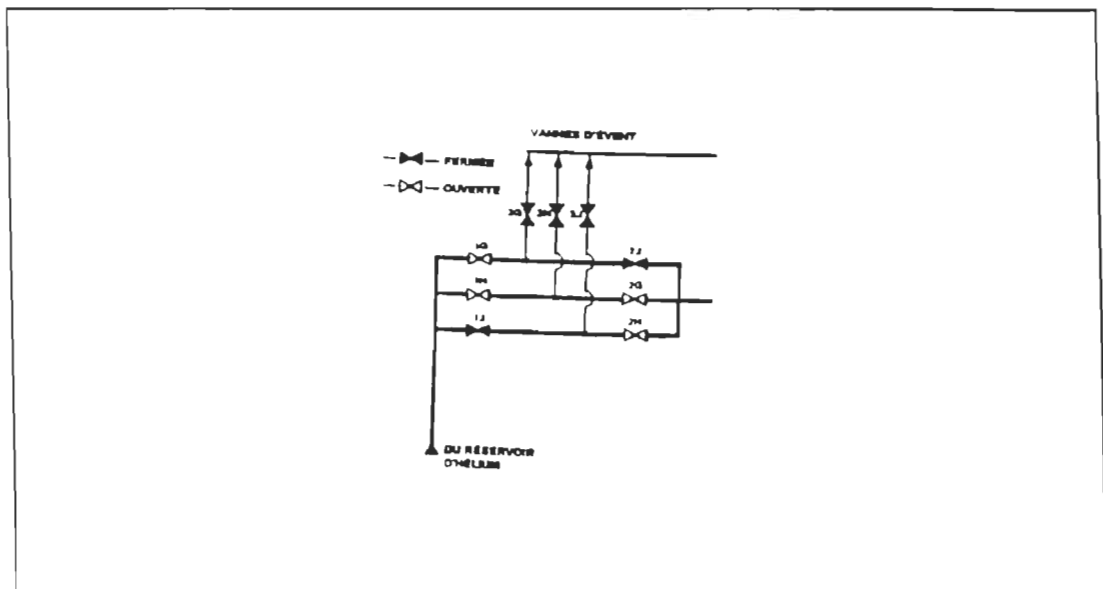


Figure 5.4 le système avec les chaînes qui ont reçu le signal, 1 chaîne actionnée

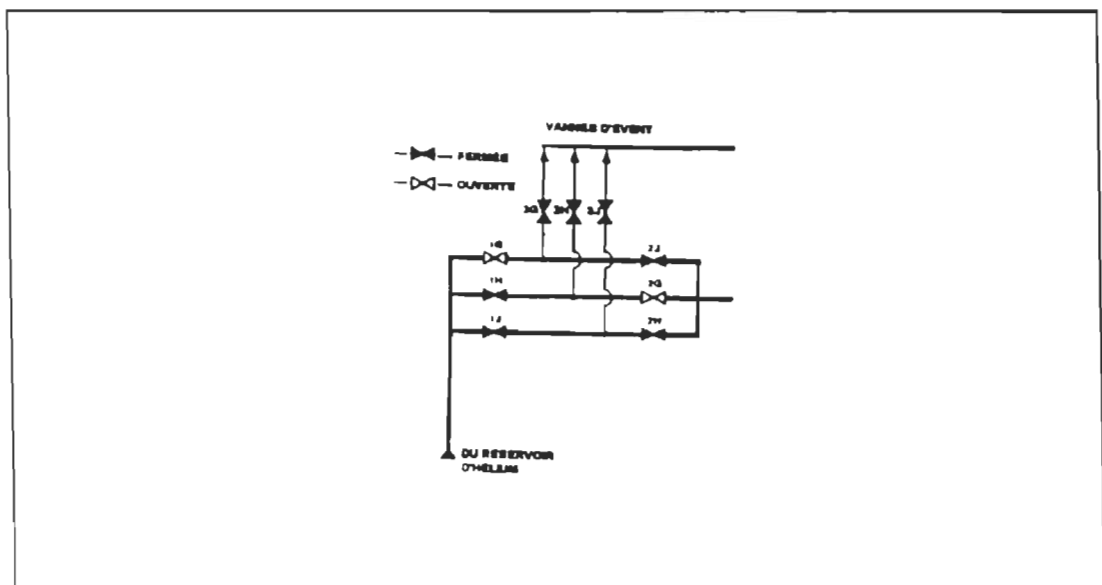


Figure 5.5 le système avec les chaînes qui ont reçu le signal, 2 chaînes actionnées

La figure 5.5 montre le système avec les chaînes G et H qui ont reçu le signal de déclenchement. Dans cette condition, le système SAU#2 est actionné, car l'hélium peut franchir les vannes pour aller vers les réservoirs de poison.

Les chaînes 2 de 3 prémunissent le système contre les pannes d'instrument. En effet, il ne faut pas que le système soit déclenché pour 1 seule défaillance de chaîne. D'autre part, cet arrangement permet aussi l'essai de chacune des chaînes par l'opérateur de la salle de commande.

À la fin de l'essai, les vannes d'évent sont ouvertes pour remettre le système à la pression normale. Ces vannes produisent un fort bruit lorsqu'elles fonctionnent.

## CHAPITRE VI

### CALCUL DE L'INDISPONIBILITÉ DU SYSTÈME

#### 6.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'évaluation de l'indisponibilité du système<sup>(6.1)</sup> composé par l'ensemble de 6 vannes décrites dans le chapitre précédent et ceci dans deux environnements différents (environnement d'exploitation normale et environnement hostile).

IL débute par une présentation des calculs des taux de défaillances des relais et des électrovannes dans les conditions hostiles ainsi qu'une étude détaillée sur le comportement du système dans les deux environnements. Le modèle SAU#2-0 représente le système à l'étude. L'évaluation des facteurs de performances ainsi que la description de l'ensemble des événements de base qui provoquent l'événement de tête ou l'événement indésirable qui est «pas de sortie d'hélium» est obtenu à l'aide du logiciel CAFTA<sup>(6.2)</sup>, le calcul des probabilités ou l'indisponibilité (voir section 6.6.1) des événements intermédiaires est obtenue à l'aide du logiciel GTPROB<sup>(6.2)</sup>. L'ensemble est présenté à l'annexe A. Le modèle simplifié appelé (SAU#2-1), est utilisé pour l'évaluation de l'indisponibilité du système dans les conditions hostiles. Dans ce modèle, les modes de défaillances des vannes sont regroupés en un seul mode de défaillance global, et les modes de défaillances des

---

<sup>(6.1)</sup> Le mot système dans ce chapitre, veut dire l'ensemble des (06) vannes

<sup>(6.2)</sup> une description du logiciel CAFTA est présenté à l'ANNEXE (E)

électrovannes sont aussi regroupés en un seul mode de défaillance global, voir (section 6.6.2), et annexe B.

Le modèle appelé (SAU#2-2) est une autre simplification du modèle (SAU#2-1), cette fois-ci, les électrovannes sont complètement ôtées du modèle et leur taux de défaillance sont ajoutés à ceux des vannes pour former une  $P_v^{(**)}$ , (section 6.6.3) et annexe C.

## 6.2 Méthodologie

L'évaluation de l'impact des conditions hostiles sur l'indisponibilité du système<sup>(\*)</sup>, se traduit par le calcul et la comparaison des paramètres de fiabilité de ce système dans les deux conditions suivantes :

**Les conditions normales**, sont celles dans lesquelles le système fonctionne habituellement. Ce sont les conditions environnementales qui existent réellement à G2 (température ambiante, pression ambiante... Etc.).

**Les conditions hostiles**, est l'ensemble des conditions environnementales du même milieu lors d'un incident. Ces dernières peuvent se traduire par une augmentation de certains ou de l'ensemble des facteurs de l'enveloppe environnementale (température, pressions, humidité... Etc.).

Les principaux équipements du système qui subissent un impact de ces facteurs environnementaux, sont : les vannes, les électrovannes et les relais.

Le manuel « Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment », donne des modèles de calcul des taux de défaillances des vannes et des électrovannes, et le « MILHDBK-217F » donne des modèles pour le calcul des taux de défaillance des relais.

---

<sup>(\*)</sup> On entend par système l'ensemble composé par les 6 vannes du système d'arrêt d'urgence numéro 2

<sup>(\*\*)</sup> Une  $P_v$  est l'ensemble formé par la vanne et son électrovanne associée

### 6.3 Démarche suivie

En absence des informations très détaillées sur les vannes et pour contourner ce problème on a suivi les étapes suivantes :

- 1- Calculer le taux de défaillances des relais dans les conditions hostiles.
- 2- Calculer le taux de défaillances des électrovannes dans les conditions hostiles.
- 3- Faire varier le taux de défaillances des vannes dans un intervalle correspondant à  $[1.5E^{-03},1]$ , (cet intervalle est choisi du fait qu'il couvre assez bien une grande variation du taux de défaillance des vannes, sachant que le taux de défaillance des vannes, sujet à l'étude, est de l'ordre de  $1.87 E^{-02}$  dans les conditions normales).
- 4- Calculer l'indisponibilité du système dans les deux milieux, (en exploitation normale et lors d'un accident), en fonction de différentes valeurs du taux de défaillance des vannes.
- 5- Comparer les deux courbes d'indisponibilité (obtenues dans les deux milieux)
- 6- Regrouper les taux de défaillance des vannes et des électrovannes en un même taux appelé taux de défaillance des  $P_v$ , dans un intervalle de  $[1.5E^{-03},1]$
- 7- Varier le taux de défaillance des relais en fonction de la variation des  $P_v$ .
- 8- Analyser les résultats.
- 9- Valider les résultats obtenus, par l'analyse des facteurs d'importance
- 10- Conclusion et recommandation.

### 6.4 Calcul du taux de défaillance des électrovannes

le modèle général de calcul des taux de défaillances des électrovannes dans un milieu hostile, est donnée par « Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment » sous forme d'équation suivante :

$$\lambda_{SO}^{(**)} = \lambda_{SO,B} * C_T + \lambda_P + \lambda_C \quad (6.1)$$

---

(\*\*) Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment



où

$\lambda_{SO}$  : taux de défaillance de l'électrovanne

$\lambda_{SO,B}$  : taux de défaillance de base de l'électrovanne

$\lambda_{SO,B} = 3.00$  défaillances/ million cycles.

$C_T$  : Coefficient qui tient compte de l'effet de la température ambiante

$$C_T = 2.28e^{-0.015 (T_r - T_o)} \quad (6.2)$$

$T_r$  : température estimée de l'électrovanne :

$T_o$  : température d'opération.

$\lambda_p$  : Taux de panne de l'assemblage de l'armature de l'électrovanne

$\lambda_C$  : Taux de panne de l'assemblage du contact

#### 6.4.1 Calcul du coefficient de température, (CT)

La température maximale que peut supporter l'électrovanne est de l'ordre de 185°F.(selon le manufacturier). Sachant que lors d'un accident, la température d'opération peut atteindre 130 °C soit l'équivalent de 266 degré F, selon le rapport de qualification environnementale des équipements à G2. Alors, le coefficient de température sera égal à :

$$C_T = 2.28e^{-0.015 (185-266)} = 7.78$$

#### 6.4.2 Calcul du taux de défaillance de l'assemblage de l'armature, (CV)

Le taux de défaillance de l'assemblage de l'armature est défini comme suite :

$$\lambda_p = \frac{10^6}{N_0} \quad (6.3)$$

où

$N_0$  : est la durée d'usure du piston.

L'influence de l'usure sur le piston de l'électrovanne, est considéré négligeable du fait que ce type d'électrovannes est considéré critique du point de vue sûreté, et par la suite il fait l'objet d'un suivi de maintenance rigoureux et il est fréquemment bien entretenu et bien lubrifié.

#### 6.4.3 Défaillance de l'assemblage du contact

$$\lambda_c = \lambda_{c.B} \cdot V^n \cdot I^m \quad (6.4)$$

$\lambda_c$  : Taux de défaillance de l'assemblage des contacts, (défaillances/million opérations)

$\lambda_{c.B}$  : Taux de défaillance de base de l'assemblage des contacts, (défaillances/million opérations)

$V$  : tension à travers l'assemblage du contact, défaillance / million opérations

$I$  : courant, ampère

$n$  : constante de courant

$m$  : constante de tension

Pour une charge résistive, le taux de défaillance de l'assemblage du contact peut se traduire par :

$$\lambda_c = \lambda_{c.v.B} * C_v * C_I \quad (6.5)$$

où

$\lambda_c$  : Taux de défaillance de l'assemblage des contacts, (défaillances/million d'opérations)

$\lambda_{c.v.B}$  : Taux de défaillance de base de l'assemblage des contacts, (1.10 défaillances / million d'opérations).

$C_v^{(*)}$  : Facteur multiplicatif, tient compte du voltage du contact

$C_I^{(**)}$  : Facteur multiplicatif, tient compte du courant du contact.

---

(\*) Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment, Figure 5.2

(\*\*) Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment, Figure 5.3

Les deux facteurs sont donnés par les équations suivantes :

$$C_V = \left( \frac{V_o}{V_r} \right)^{0.75} \quad (6.6)$$

et

$$C_I = \left( \frac{I_o}{I_r} \right)^{1.14} \quad (6.7)$$

la tension et le courant limite, spécifiés par le manufacturier sont respectivement :  $V_R = 48$  v et  $I_R = 330$  mA

Pour une tension et un courant d'opération de l'ordre de  $V_o = 49.5$ v et  $I_o = 200$  mA, on obtient

$$C_V = 3.50 * \left( \frac{49.5}{48} \right)^{1.14} = 3.62$$

$$C_I = \left( \frac{0.2}{0.33} \right)^{0.75} = 1.97$$

Alors :

$$\lambda_c = 1.10 * 3.62 * 1.97 = 7.84 \text{ défaillances / million d'opérations}$$

$\lambda_{so} = \lambda_{so,B} * C_T + \lambda_c = 3 * 7.68 + 7.84 = 30.88 \text{ / million de cycles}$
---

Le nombre de cycles (opération) est de l'ordre de 5 fois par semaine  $\approx$  1cycle chaque 9.8 heures. Le taux de défaillance de l'électrovanne sera alors :

(30.88 / 9.8) par 1 million d'heures

$\lambda_{so} = 3.15 \text{ défaillances / } 10^6 \text{ heures}$
---

$\lambda_{so} = 2.75 * 10^{-2} \text{ défaillances / année}$
--

## 6.5 Calcul du taux de défaillance des relais du système des vannes

Le modèle<sup>(\*)</sup> des taux de défaillance des relais est donné par l'équation suivante :

$$\lambda_p = \lambda_h * \pi_L * \pi_C * \pi_{CYC} * \pi_F * \pi_Q * \pi_E \quad \text{défaillance / } 10^6 \text{ heures} \quad (6.8)$$

où

$\lambda_p$  : taux de défaillance du relais

$\lambda_h$  : taux de défaillance de base, est calculé selon la formule suivante :

$$\lambda_h = 0.0059 \exp \left( \frac{-0.19}{8,617 * 10^{-5}} \left[ \frac{1}{T + 273} - \frac{1}{298} \right] \right) \quad (6.9)$$

où

T : Température ambiante.

$\pi_L$  : Facteur de stress dû à la charge

dans le cas d'une charge résistive, l'équation (6.9) peut s'écrire comme suite :

$$\pi_L = \exp \left( \frac{S}{0.8} \right)^2 \quad (6.10)$$

S : rapport du courant de charge en opération sur le courant estimé de la charge résistive.

$\pi_C$  : Facteur de la forme du contact

$\pi_{CYC}$  : Facteur de cycle

$\pi_Q$  : Facteur de qualité

$\pi_E$  : Facteur d'environnement

$\pi_F$  : Facteur de construction

---

(\*) Voir pages, 13.1 et 13.2 du MIL-HDBK-217F

### 6.5.1 Calcul du taux de défaillance de base

La température ambiante au sein du SAU#2 est évaluée à 30 °C par contre, la température estimée du relais est de 100 °C, le tableau 1, page 13.1 du MIL–HDBK 217F donne une température estimée de l'ordre de 85°C

$$\lambda_h = 0.0059 \exp \left( \frac{-0.19}{8.617 * 10^{-5}} \left[ \frac{1}{30 + 273} - \frac{1}{298} \right] \right) = 0.0067 \text{ défaillances}/10^6 \text{ h.}$$

### 6.5.2 Calcul du facteur de stress

Le facteur de stress est calculé selon la formule (6.10).

En absence des informations à notre disposition, sur le facteur de stress, on prend la moyenne soit S = 50%, on obtient

$$\pi_L = 1.478$$

### 6.5.3 Calcul du facteur de forme de contact

Le relais en question est de forme 4PDT où P signifie : pôle ;  
D signifié double et T pour "throw".

$$\pi_C = 5.50$$

### 6.5.4 Calcul de facteur de cycle

Le nombre de cycles est inférieur à 10 donc

$$\pi_{CYC} = 1$$

### 6.5.5 Calcul du facteur de construction

Le relais à l'étude est de type "mercury wetted"

$$\pi_F = 2$$

### 6.5.6 Calcul du facteur de qualité

Le relais est de type commercial, alors, son facteur de qualité est :  $\pi_Q = 2.9$

### 6.5.7 Calcul du facteur d'environnement

L'environnement est de type GF (ground fixe) alors.  $\pi_E = 2.0$ .

Un résumé de l'ensemble des facteurs qui influencent le taux de défaillance des relais est présenté ci-dessous.

$\lambda_b$	0.0067
$\pi_L$	1.478
$\pi_C$	5.50
$\pi_{CYC}$	1
$\pi_F$	2
$\pi_Q$	2.9
$\pi_E$	2

à partir de l'équation (6.8), le taux de défaillance du relais sera égal à :

$$\lambda_p = 0.0067 * 1.478 * 5.5 * 1 * 2 * 2.9 * 2$$

$$\lambda_p = 6,37E-01 \text{ défaillances / } 10^6 \text{ heures}$$

$$\lambda_p = 5.53E-03 \text{ défaillances / Année}$$

### 6.6 Calcul de l'indisponibilité du système en fonction du taux de défaillance des vannes

Sachant les valeurs des taux de défaillances (dans un environnement hostile) des électrovannes et des relais, calculées aux sections précédentes, on fait varier le taux de défaillance des vannes dans un intervalle de  $\lambda_v = [1.5E-03, 1]$  (cet intervalle est justifié par le fait qu'il permette une grande variation de part et d'autre de la valeur réelle du taux de défaillance  $\lambda_v$  dans les conditions d'exploitation normales à G2 qui est de l'ordre de  $1.87 E-02$  et dépasse largement les valeurs des taux de défaillance des vannes du même type, spécifiées dans les différentes bases de données

génériques) et on calcule l'indisponibilité du système dans les deux cas, (conditions d'exploitation normales, conditions hostiles).

Les taux de défaillance des équipements en exploitation et lors d'un accident sont présentés dans le tableau 6.1

**Tableau 6.1**

**Taux de défaillances des équipements dans les deux environnements**

	$\lambda_{el}$	$\lambda_v$	RL1X	RL4X
<b>Conditions normales</b> <sup>(a)</sup>	5.78 E-03	1.87 E-02	9.0 E-05	3.18 E-03
<b>Conditions hostiles</b>	2.75 E-02 <sup>(b)</sup>	variable	5.53 E-03 <sup>(c)</sup>	5.53 E-03 <sup>(c)</sup>

$\lambda_{el}$  : taux de défaillance de l'électrovanne

$\lambda_v$  : taux de défaillance de la vanne

RL1X et RL4X : relais dont «X», représente les chaînes H, G ou J.

### 6.6.1 Calcul de l'indisponibilité du système dans les conditions normales d'exploitation en fonction du taux de défaillance des vannes

En choisissant un intervalle de variation de  $\lambda_v = [1.5E-03, 1]$  défaillances/année et en fixant un pas de  $3.44E-02$  (ce pas est choisit seulement dans le but d'avoir une trentaine de valeurs différentes du taux de défaillances des vannes).

Le calcul de l'indisponibilité<sup>(6.3)</sup> du système dans les conditions normales d'exploitation à partir de ces différentes valeurs est présenté au tableau 6.2.

<sup>(a)</sup> SAU#2, CANDU 600

<sup>(b)</sup> Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment

<sup>(c)</sup> MIL-HDBK-217F

<sup>(6.3)</sup> Le modèle utilisé est SAU#2-0. voir Annexe (A)

**Tableau 6.2**  
**Indisponibilité du système dans les conditions normales**  
**d'exploitation en fonction du taux de défaillances des vannes**

$\lambda_v^{(*)}$	$A^{(**)}$	$\lambda_v$	A
1.50E-03	6.76E-09	5,18E-01	7,51E-07
3.59E-02	3.45E-08	5,52E-01	8,47E-07
7,03E-02	6,29E-08	5,86E-01	9,51E-07
1.05E-01	9,28E-08	6,21E-01	1,07E-06
1.39E-01	1,24E-07	6,55E-01	1,19E-06
1.74E-01	1,58E-07	6,90E-01	1,33E-06
2.08E-01	1,94E-07	7,24E-01	1,48E-06
2.42E-01	2,34E-07	7,58E-01	1,64E-06
2.77E-01	2,79E-07	7,93E-01	1,81E-06
3.11E-01	3,28E-07	8,27E-01	1,99E-06
3.46E-01	3,83E-07	8,62E-01	2,20E-06
3.80E-01	4,42E-07	8,96E-01	2,41E-06
4.14E-01	5,07E-07	9,30E-01	2,63E-06
4.49E-01	5,81E-07	9,65E-01	2,88E-06
4.83E-01	6,61E-07	9,99E-01	3,13E-06

### 6.6.2 Calcul de l'indisponibilité du système dans les conditions hostiles en fonctions du taux de défaillance des vannes

Pour déterminer l'indisponibilité<sup>(6.4)</sup> du système dans les conditions hostiles on choisit le même intervalle de défaillances pour les vannes dans les conditions normales d'exploitation. Soit :  $\lambda_v = [1.5E-03, 1]$  défaillances/année. Pour un pas de l'ordre de 3.44E-02, on obtient 30 valeurs du taux de défaillance de la vanne (tableau 6.3).

---

(\*) Taux de défaillance [défaillances / Année]

(\*\*) Indisponibilité du système [Année / Année]

(6.4) Le modèle utilisé est SAU#2-1, voir Annexe (B)



Les deux figures, 6.1 et 6.2 montrent la variation de l'indisponibilité du système en fonction de la variation des taux de défaillances des vannes dans les deux milieux.

**Tableau 6.3**

**Indisponibilité du système dans les conditions hostiles  
en fonction du taux de défaillances des vannes**

$\lambda_v$	A	$\lambda_v$	A
1,50E-03	8,74E-08	5,18E-01	1,85E-06
3,59E-02	1,81E-07	5,52E-01	2,02E-06
7,03E-02	2,76E-07	5,86E-01	2,19E-06
1,05E-01	3,72E-07	6,21E-01	2,38E-06
1,39E-01	4,70E-07	6,55E-01	2,58E-06
1,74E-01	5,72E-07	6,90E-01	2,79E-06
2,08E-01	6,75E-07	7,24E-01	3,01E-06
2,42E-01	7,82E-07	7,58E-01	3,24E-06
2,77E-01	8,96E-07	7,93E-01	3,49E-06
3,11E-01	1,01E-06	8,27E-01	3,74E-06
3,46E-01	1,14E-06	8,62E-01	4,02E-06
3,80E-01	1,26E-06	8,96E-01	4,30E-06
4,14E-01	1,40E-06	9,30E-01	4,60E-06
4,49E-01	1,54E-06	9,65E-01	4,92E-06
4,83E-01	1,69E-06	1,00E+00	5,26E-06

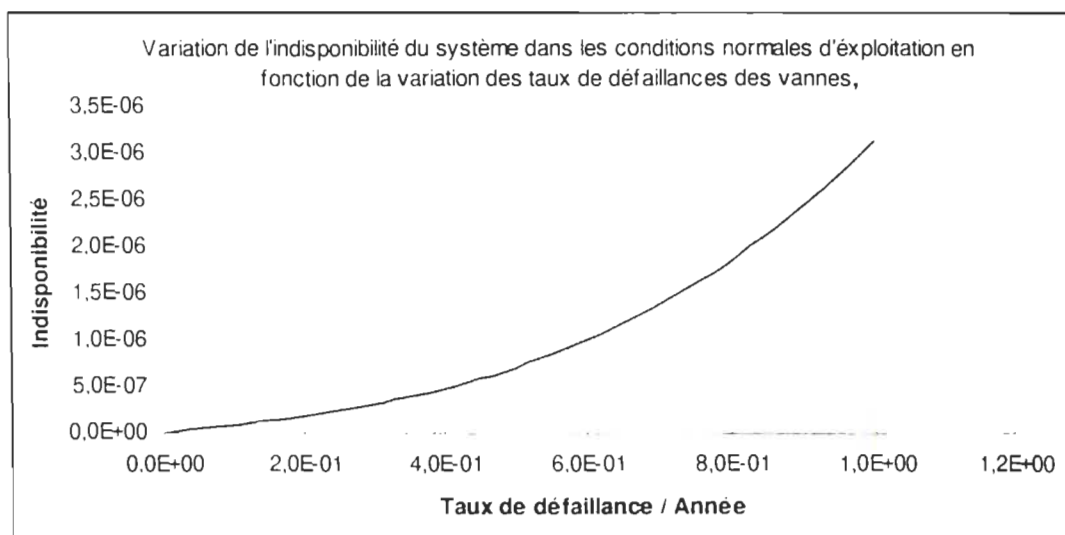


Figure 6.1 Variation de l'indisponibilité, dans les conditions normales

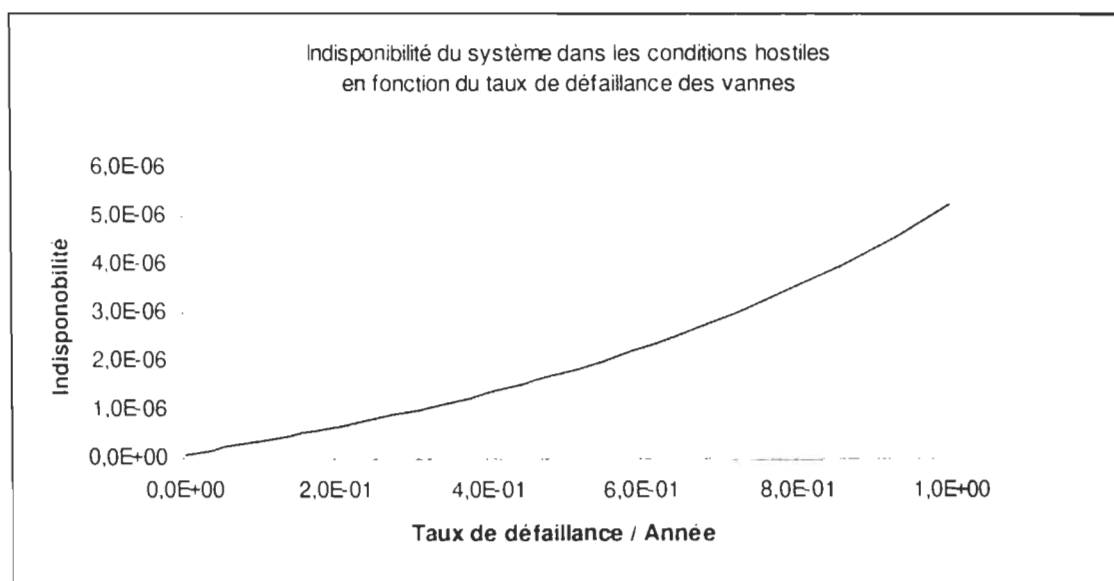


Figure 6.2 Variation de l'indisponibilité dans les conditions hostiles.

Pour comparer la variation des deux courbes ensemble par rapport au taux de défaillance des vannes, on garde le même intervalle,  $\lambda_v = [1.5E-03, 1]$ , les différentes valeurs d'indisponibilité pour les conditions hostiles et normales, sont représentées dans le tableau 6.4 ci-dessous et la courbe 6.3 montre l'allure de cette variation.

**Tableau 6.4**  
**Indisponibilité du système dans les deux milieux en fonction**  
**des taux de pannes des vannes dans un même intervalle**

$\lambda_v$ défaillances / année	$A_N^*$ année / année	$A_H^{**}$ année / année	$\lambda_v$	$A_N$	$A_H$
1,50E-03	6,76E-09	8,74E-08	5,18E-01	7,51E-07	1,85E-06
3,59E-02	3,45E-08	1,81E-07	5,52E-01	8,47E-07	2,02E-06
7,03E-02	6,29E-08	2,76E-07	5,86E-01	9,51E-07	2,19E-06
1,05E-01	9,28E-08	3,72E-07	6,21E-01	1,07E-06	2,38E-06
1,39E-01	1,24E-07	4,70E-07	6,55E-01	1,19E-06	2,58E-06
1,74E-01	1,58E-07	5,72E-07	6,90E-01	1,33E-06	2,79E-06
2,08E-01	1,94E-07	6,75E-07	7,24E-01	1,48E-06	3,01E-06
2,42E-01	2,34E-07	7,82E-07	7,58E-01	1,64E-06	3,24E-06
2,77E-01	2,79E-07	8,96E-07	7,93E-01	1,81E-06	3,49E-06
3,11E-01	3,28E-07	1,01E-06	8,27E-01	1,99E-06	3,74E-06
3,46E-01	3,83E-07	1,14E-06	8,62E-01	2,20E-06	4,02E-06
3,80E-01	4,42E-07	1,26E-06	8,96E-01	2,41E-06	4,30E-06
4,14E-01	5,07E-07	1,40E-06	9,30E-01	2,63E-06	4,60E-06
4,49E-01	5,81E-07	1,54E-06	9,65E-01	2,88E-06	4,92E-06
4,83E-01	6,61E-07	1,69E-06	9,99E-01	3,13E-06	5,26E-06

\* Indisponibilité du système dans les conditions normales

\*\* Indisponibilité du système dans les conditions hostiles

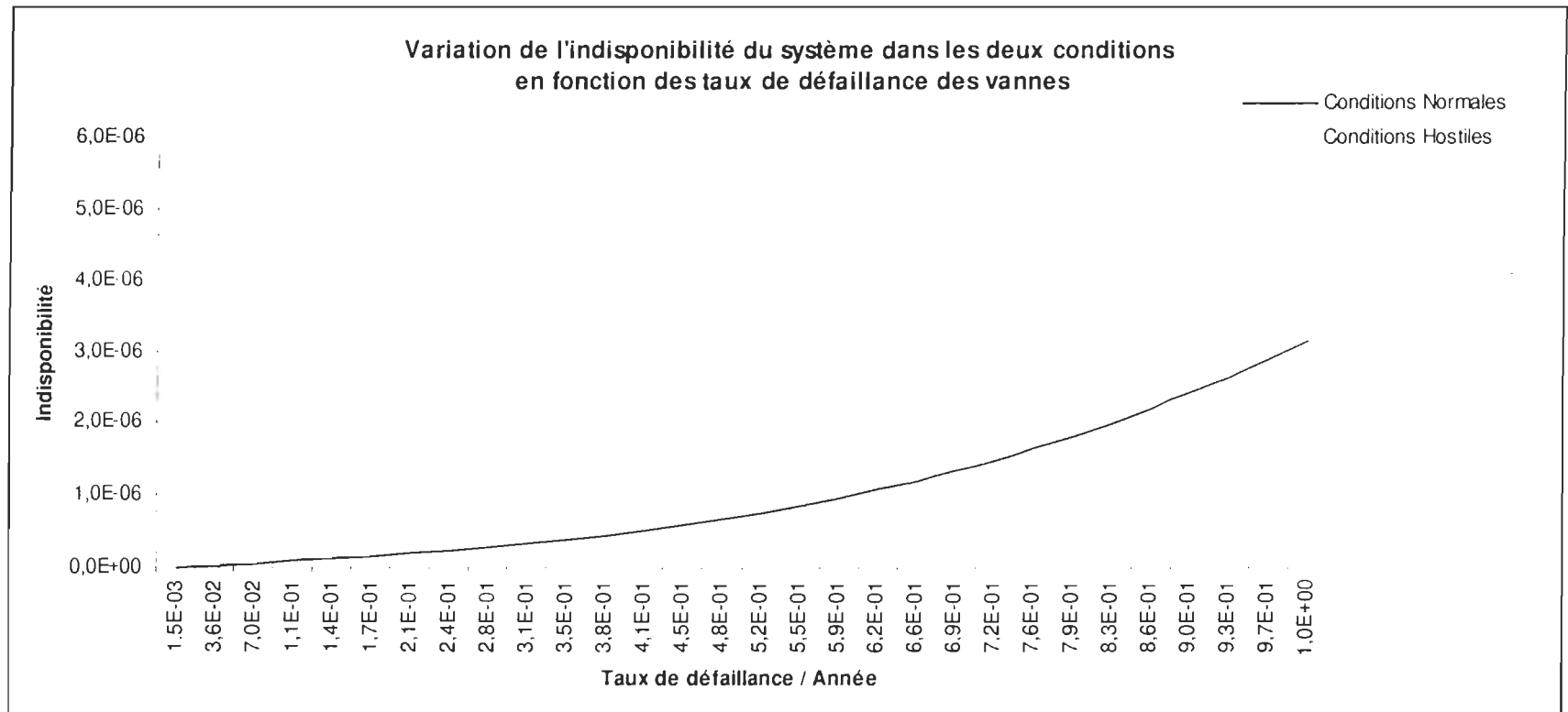


Figure 6.3 Variation de l'indisponibilité dans les deux conditions

À partir de  $\lambda_v \approx 4.8E-01$  défaillance /année, on constate que la variation entre l'indisponibilité dans le milieu hostile et l'indisponibilité dans le milieu d'exploitation est importante.

### 6.6.3 Calcul de l'indisponibilité du système en fonction de la variation de la $P_v$ et des relais.

Pour pouvoir examiner la variation de la  $P_v$  (vanne + électrovanne) en fonction de la variation des relais dans les conditions hostiles on commence par réduire l'arbre de défaillance et voici la démarche suivie.

- 1- Enlever du système, le mode de défaillance qui correspond à la défaillance de base de l'électrovanne.
- 2- Regrouper les modes de défaillance de la vanne et de l'électrovanne en un mode appelé mode des  $P_v$ .

Comme le temps de réparation des électrovannes (54 heures ) est différent de celui des vannes (58 heures), l'indisponibilité des  $P_v$  sera calculée de la manière suivante :

$$A_{P_v} = (\lambda_{et} \cdot 54 + \lambda_v \cdot 58) / 8760 \text{ année / année} \quad (6.11)$$

On maintient un temps de réparation égal à 58 h, le taux de défaillance des  $P_v$  sera calculé comme suite :

$$\lambda_{P_v} = [(A_{P_v} \cdot 8760) / 58] \text{ défaillances / année}$$

- 3- Varier les taux de défaillance des relais dans un intervalle de  $[2.71E-02, 1]$  en fonction de la variation des  $P_v$  dans un intervalle de  $[1.5E-03, 1]$  défaillances / année. (Cet intervalle est conservateur, sachant qu'on a déjà mentionné que c'est à partir de  $\lambda_v \approx 4.8E-01$  qu'il y a une

différence significative de l'ordre de :  $\lambda_v = 1\text{E-}06$  défaillances / année, entre l'indisponibilité du système dans les deux environnements).

Les valeurs de l'indisponibilité<sup>(6.5)</sup> sont représentées au tableau 6.5 ainsi que la courbe associée Fig. 6.4 :

**Tableau 6.5 Indisponibilité du système en fonction  
du taux de défaillances des  $P_v$ ,**

Taux de défaillance des $P_v$ [défaillances/année]	Indisponibilité [Année/ Année]				
	RL = E-05	RL = E-04	RL = E-03	RL = E-02	RL = E-01
0,0271	4,79E-10	1,39E-09	1,36E-08	1,78E-07	5,88E-06
0,0615	9,44E-10	3,55E-09	3,09E-08	3,47E-07	7,56E-06
0,0959	2,73E-09	6,74E-09	4,93E-08	5,17E-07	9,24E-06
0,1306	6,10E-09	1,16E-08	6,93E-08	6,90E-07	1,09E-05
0,1646	1,15E-08	1,84E-08	9,11E-08	8,61E-07	1,26E-05
0,1996	1,99E-08	2,82E-08	1,16E-07	1,04E-06	1,43E-05
0,2336	3,12E-08	4,10E-08	1,44E-07	1,22E-06	1,60E-05
0,2676	4,57E-08	5,75E-08	2,12E-07	1,22E-06	1,77E-05
0,3026	6,56E-08	7,89E-08	2,12E-07	1,59E-06	1,94E-05
0,3366	8,99E-08	1,05E-07	2,53E-07	1,78E-06	2,11E-05
0,3716	1,20E-07	1,37E-07	3,01E-07	1,98E-06	2,28E-05
0,4056	1,56E-07	1,74E-07	3,53E-07	2,18E-06	2,45E-05
0,4396	1,99E-07	2,18E-07	4,12E-07	2,39E-06	2,62E-05
0,4746	2,49E-07	2,70E-07	4,79E-07	2,61E-06	2,79E-05
0,5086	3,06E-07	3,29E-07	5,53E-07	2,83E-06	2,96E-05
0,5436	3,74E-07	3,97E-07	6,37E-07	3,07E-06	3,14E-05

<sup>(6.5)</sup> Le modèle utilisé est SAU#2-2. voir Annexe ©

**Tableau 6.5 (suite)**

0,5776	3,31E-06	1,02E-05	2,10E-05	3,31E-05
0,6116	3,56E-06	1,09E-05	2,22E-05	3,49E-05
0,6466	3,83E-06	1,15E-05	2,34E-05	3,67E-05
0,6806	4,10E-06	1,22E-05	2,46E-05	3,84E-05
0,7156	4,39E-06	1,29E-05	2,59E-05	4,03E-05
0,7496	4,68E-06	1,35E-05	2,71E-05	4,20E-05
0,7836	4,98E-06	1,42E-05	2,83E-05	4,38E-05
0,8186	5,31E-06	1,49E-05	2,96E-05	4,57E-05
0,8526	5,63E-06	1,56E-05	3,08E-05	4,75E-05
0,8876	5,99E-06	1,64E-05	3,21E-05	4,94E-05
0,9216	6,34E-06	1,71E-05	3,34E-05	5,12E-05
0,9556	6,72E-06	1,79E-05	3,47E-05	5,31E-05
0,9906	7,11E-06	1,87E-05	3,61E-05	5,50E-05
1,0246	7,52E-06	1,95E-05	3,74E-05	5,69E-05

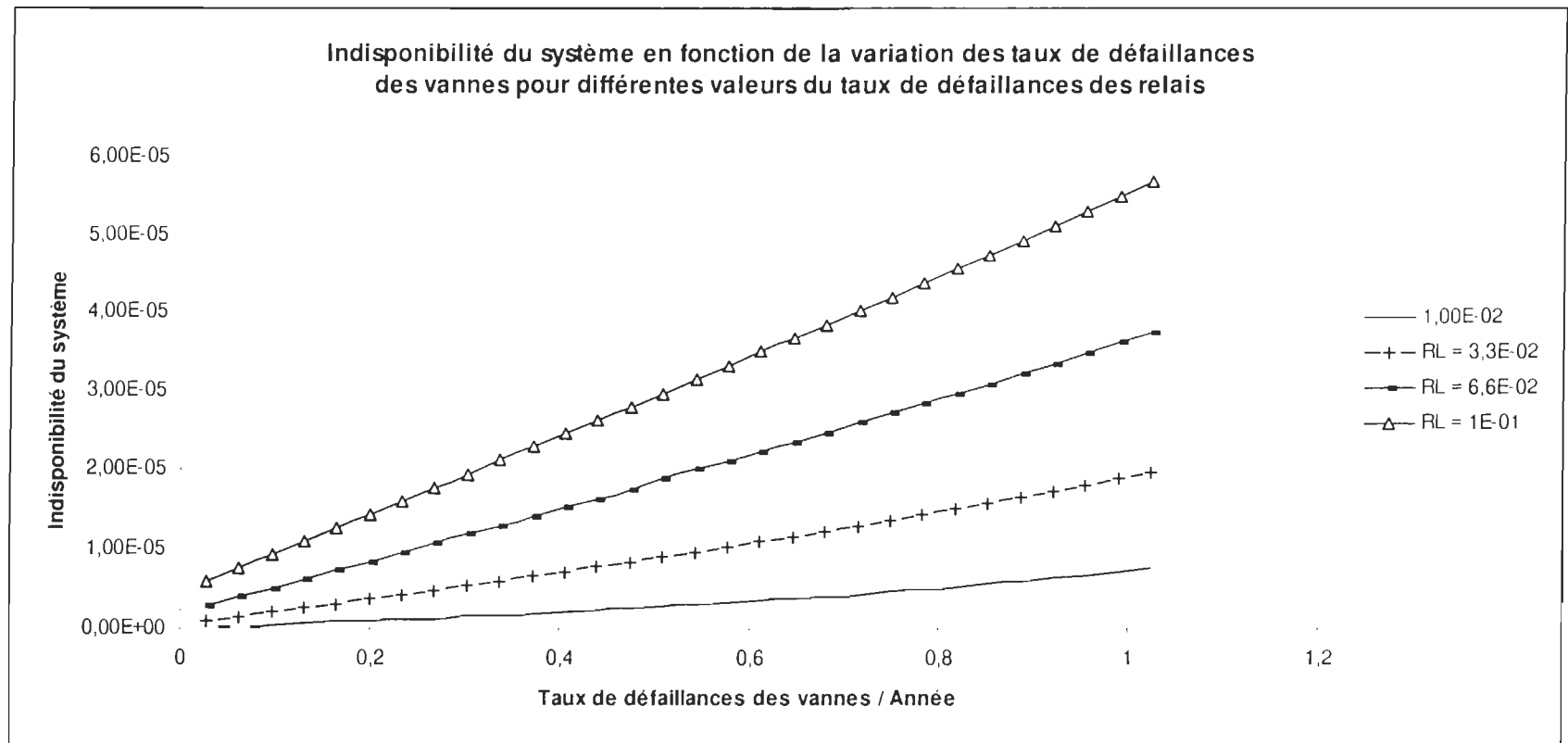


Figure 6.5 Variation de l'indisponibilité en fonction des taux de défaillances des  $P_v$  et des relais



Le graphique de la figure 6.4 montre que l'indisponibilité du système en fonction du taux de défaillance des relais et de la variation du taux de défaillances des vannes commence à varier sensiblement à partir de  $\lambda_{RL} = 1E-02$  jusqu'à  $\lambda_{RL} = 1E-01$ .

Le tableau 6.6 montre les valeurs de l'indisponibilité en fonction de la variation du taux de défaillance des vannes dans le même intervalle qu'auparavant,  $[2.71E-02, 1]$  pour les taux de défaillances des relais,  $[1E-02, 3.3E-02, 6.6E-02, 1E-01]$ .

la courbe de l'indisponibilité est présentée à la figure 6.5.

**Tableau 6.6**

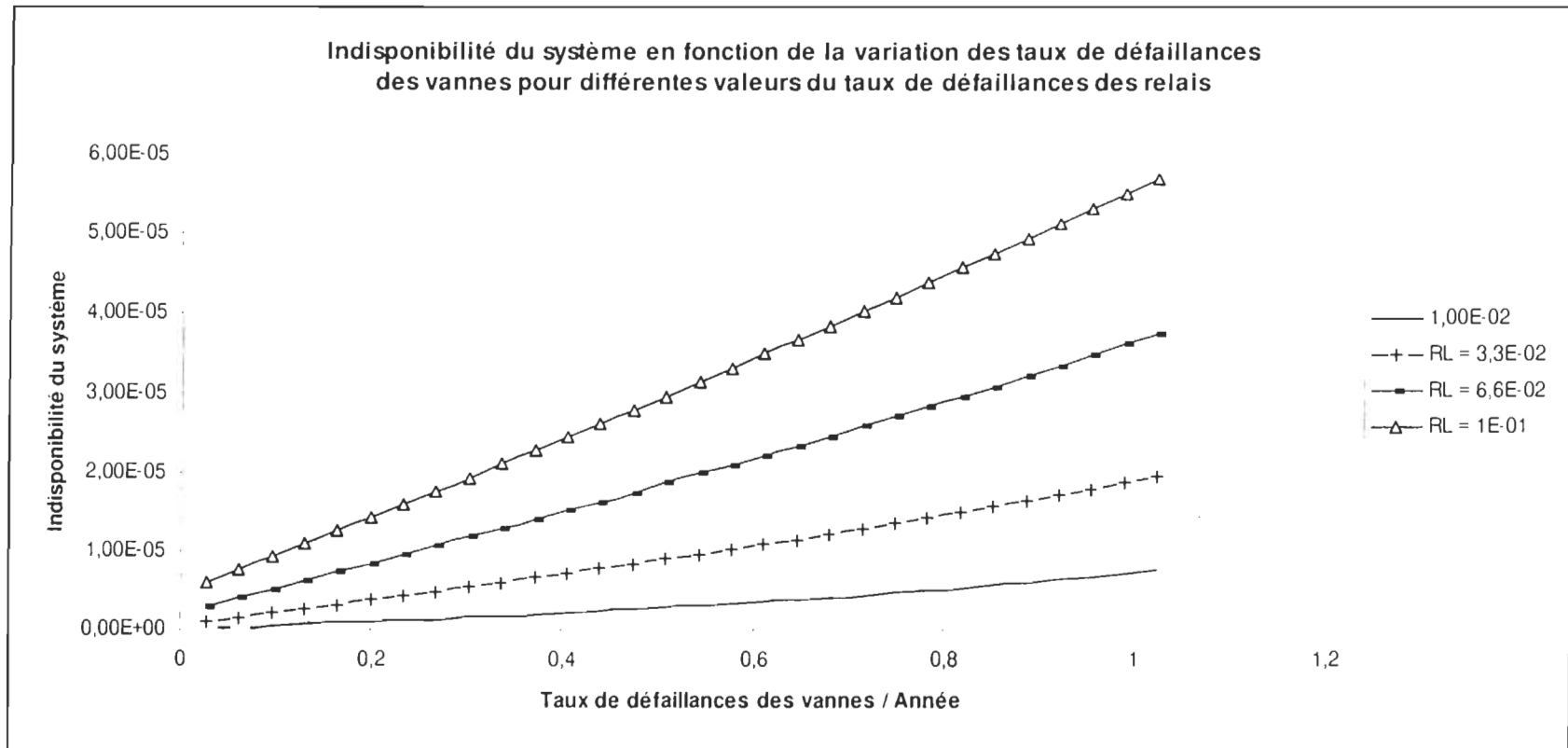
**Variation de l'indisponibilité en fonction des taux de défaillances des relais et des**

**$P_v$**

	Indisponibilité du système			
$P_v$	RL = 0.01	RL = 0.033	RL = 0.066	RL = 0.1
0,0271	1,78E-07	9,33E-07	2,86E-06	5,88E-06
0,0615	3,47E-07	1,49E-06	3,97E-06	7,56E-06
0,0959	5,17E-07	2,05E-06	5,08E-06	9,24E-06
0,1306	6,90E-07	2,61E-06	6,20E-06	1,09E-05
0,1646	8,61E-07	3,16E-06	7,30E-06	1,26E-05
0,1996	1,04E-06	3,74E-06	8,44E-06	1,43E-05
0,2336	1,22E-06	4,29E-06	9,54E-06	1,60E-05
0,2676	1,22E-06	4,86E-06	1,07E-05	1,77E-05
0,3026	1,59E-06	5,44E-06	1,18E-05	1,94E-05
0,3366	1,78E-06	6,01E-06	1,29E-05	2,11E-05
0,3716	1,98E-06	6,61E-06	1,41E-05	2,28E-05
0,4056	2,18E-06	7,19E-06	1,52E-05	2,45E-05
0,4396	2,39E-06	7,78E-06	1,63E-05	2,62E-05
0,4746	2,61E-06	8,39E-06	1,75E-05	2,79E-05
0,5086	2,83E-06	9,00E-06	1,87E-05	2,96E-05
0,5436	3,07E-06	9,63E-06	1,99E-05	3,14E-05

Tableau 6.6 (suite)

0,5776	3,31E-06	1,02E-05	2,10E-05	3,31E-05
0,6116	3,56E-06	1,09E-05	2,22E-05	3,49E-05
0,6466	3,83E-06	1,15E-05	2,34E-05	3,67E-05
0,6806	4,10E-06	1,22E-05	2,46E-05	3,84E-05
0,7156	4,39E-06	1,29E-05	2,59E-05	4,03E-05
0,7496	4,68E-06	1,35E-05	2,71E-05	4,20E-05
0,7836	4,98E-06	1,42E-05	2,83E-05	4,38E-05
0,8186	5,31E-06	1,49E-05	2,96E-05	4,57E-05
0,8526	5,63E-06	1,56E-05	3,08E-05	4,75E-05
0,8876	5,99E-06	1,64E-05	3,21E-05	4,94E-05
0,9216	6,34E-06	1,71E-05	3,34E-05	5,12E-05
0,9556	6,72E-06	1,79E-05	3,47E-05	5,31E-05
0,9906	7,11E-06	1,87E-05	3,61E-05	5,50E-05
1,0246	7,52E-06	1,95E-05	3,74E-05	5,69E-05



## 6.7 Facteurs d'importance

Les facteurs d'importance sont des mesures quantitatives, associées à des événements primaires, ils peuvent nous renseigner sur l'importance de la contribution de ces événements pour la réalisation de l'événement de tête. Leur importance se manifeste lorsqu'on veut savoir, dans un système, quel composant est le plus critique ? ou bien quel composant faut-il réparer en premier, dans un système en panne ?

Les facteurs de performances calculés sont donnés par le logiciel CAFTA et présentés en annexe A, tableau A.3. On distingue quatre facteurs à savoir Fussell-Vesely, Birnbaum, le Risk Reduction Worth (RRW) et le Risk Achievement Worth (RAW).

Le facteur d'importance de Fussell-vesely, (FV) se définit comme la fraction de la probabilité d'occurrence de l'événement de tête qui est dû à un événement primaire E.

$$FV = \frac{P(T) - P(T / E = 0)}{P(T)} \quad (6.12)$$

où  $P(T)$  : Probabilité d'occurrence de l'événement de tête  
 $P(T/E=0)$  : Probabilité conditionnelle d'occurrence de l'événement de tête sachant que la probabilité d'occurrence de l'événement primaire est nulle.

On remarque que les composants qui ont un facteur de Fussell-Vesely (FV) le plus élevé sont les contacts des relais,  $FV = 3.52 \text{ E-}01$  (tableau A.3, annexe A). Cela veut dire que la défaillance des relais contribue d'un rapport de 1/3 à la défaillance du

système. On peut aussi dire que si une défaillance survient sur les relais, le système perd 1/3 de sa capacité de fonctionner.

Le facteur d'importance de Biran (BI) est une mesure de la différence de la valeur de la probabilité d'occurrence de l'événement de tête lorsque l'événement E se réalise par rapport à lorsqu'il ne se réalise pas.

$$BI = P(T / E = 1) - P(T / E = 0) \quad (6.13)$$

où  $P(T/E = 1)$  : Probabilité conditionnelle d'occurrence de l'événement de tête étant donné que la probabilité d'occurrence de l'événement primaire E est égale à l'unité.

Selon le facteur de Birman (tableau A.3, annexe A) les contacts des relais se classent en premier avec un  $BI = 3.45E-04$ . Cela veut dire que la différence entre l'indisponibilité du système sachant que les contacts des relais sont complètement indisponibles et l'indisponibilité du système sachant que les contacts des relais sont complètement disponibles est de l'ordre de  $3.45 E^{-04}$ . Cet écart entre les deux probabilités qui est le plus élevé, comparativement avec les autres facteurs (BI) des composants du système, justifie l'importance de la disponibilité des relais pour assurer une disponibilité meilleure au système.

Le facteur d'importance RAW détermine le nombre de fois que la probabilité de l'événement de tête augmente si la défaillance de l'événement primaire E survient, soit :

$$RAW = \frac{P(T / E = 1)}{P(T)} \quad (6.14)$$

les contacts des relais se classent en premier avec un  $RAW = 1.90E+04$  (tableau A.3, annexe A).

ça veut dire que si les contacts des relais et par la suite les relais seront complètement disponibles, l'indisponibilité du système augmente de  $1.90E+04$ , cela est en cohérence avec les résultats obtenus précédemment.

Le facteur d'importance  $RRW$  détermine le nombre de fois que la probabilité de l'événement de tête diminue si la défaillance de l'événement primaire  $E$  est impossible, soit :

$$RRW = \frac{P(T)}{P(T / E = 0)} \quad (6.15)$$

d'après le tableau A.3, annexe A, le facteur  $RRW$  pour les contacts des relais est le plus important,  $RRW = 1.544$ . En d'autres mots cela équivaut à dire que, si les contacts des relais et par la suite les relais sont complètement fonctionnent sans défaillance, l'indisponibilité de tout le système diminuera d'une fois et demie.

## 6.8 Conclusion

la variation de l'indisponibilité du système de vannes en fonction de leurs taux de défaillance dans un même intervalle,  $[1.5E-03, 1]$  et dans deux environnement différents (environnement d'exploitation normale et environnement hostile) indiquée au tableau 6.4 et représentée par la figure 6.3 nous a permis de remarquer que l'indisponibilité dans les conditions hostiles a augmenté de  $1.08E-06$  en moyenne par rapport à la disponibilité dans les conditions normales. Cette augmentation devient significative à partir de  $\lambda_v \approx 4.83-01$  où la valeur de la différence entre les deux indisponibilités atteint l'ordre de  $1.08E-06$ . De cette remarque, on constate que le taux de défaillance des vannes ne doit pas dépasser la valeur de :  $\lambda_v \approx 4.83-01$  si on veut s'assurer que le système fonctionne dans les conditions hostiles avec un taux de défaillance acceptable.

Après regroupement des modes de défaillance des vannes et des électrovannes en un seul mode et suite à une étude plus poussée, constituée essentiellement de l'analyse des figures 6.4 et 6.5 ainsi que l'ensemble des facteurs de performance, nous a révélé que l'élément ou le composant le plus critique est les relais. En effet, une grande variation des  $P_v$  (électrovanne + vannes), n'engendre pas une grande variation de l'indisponibilité du système si les valeurs des taux de défaillance des relais sont assez basses.

De cela il est clair que le choix des relais a une importance majeure dans la contribution aux faibles taux d'indisponibilité.

## 6.9 Conclusion générale

Il est reconnu dans les centrales nucléaires qu'un équipement non qualifié pour fonctionner dans des conditions hostiles lors d'un accident majeur sera considéré comme un équipement complètement indisponible. L'avantage est d'éviter d'avoir des surprises désagréables, en comptant sur un équipement qui n'a pas prouvé sa capacité de fonctionner dans telles contraintes. Aussi il est facile de le considérer comme indisponible et par la suite épargner de faire des études fastidieuses sachant qu'il ne fonctionnera pas adéquatement.

Cependant, pour les analyses des scénarios, d'accidents probables de se réaliser ou bien pour juger, s'il est nécessaire de qualifier tous les équipements de la centrale ou mieux encore, pour les études d'évaluations de sûreté, il s'avère nécessaire de savoir le comportement des équipements non qualifiés lors d'un accident majeur, leur influence sur les équipements considérés qualifiés et sur l'ensemble des autres équipements de la centrale nucléaire. Il est important aussi de savoir pendant combien de temps ces équipements fonctionnent-ils adéquatement ? et avec quelle probabilité ? .

Ce projet d'étude a clarifié certaines notions et démontré l'importance de prendre en considération l'influence des paramètres environnementaux sur le comportement des

équipements dans les études de fiabilité, surtout si ces équipements sont appelés à fonctionner dans des conditions hostiles d'environnement.

L'approche utilisée dans ce projet et qui vise le calcul des paramètres de fiabilité dans un environnement sévère, s'inscrit dans une approche de sûreté dont le premier souci est de s'assurer que les équipements de G2, seront capables de fonctionner dans des conditions hostiles. Cette approche se veut une continuité des tests accélérés qui sont généralement réalisés dans les laboratoires afin de juger de la capacité d'un équipement à continuer à fonctionner sous contraintes, ces tests donnent une idée sur le comportement de cet équipement, mais il reste que la différence entre l'environnement au laboratoire et l'environnement dans lequel l'équipement était conçu pour fonctionner est généralement importante. Cela s'explique d'une part, par la difficulté de réunir au laboratoire, tous les paramètres qui régissent un environnement et d'autre part, par le fait que chaque environnement évolue d'une manière spécifique. En effet, un équipement qui peut supporter des contraintes qui surgissent progressivement peut ne pas fonctionner dans ces mêmes conditions, si les contraintes apparaissent subitement ou bien dans un temps très court. Ajoutons à cela la complexité de l'interaction de ces paramètres entre eux, qui rend le jugement basé uniquement sur les tests faits aux laboratoires très optimistes pour s'assurer du bon fonctionnement de l'équipement lors d'un accident.

Les méthodes utilisées dans ce projet de recherche pour déterminer l'impact des conditions hostiles sur l'indisponibilité du système des vannes, combinent celles du "Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment " et celles du " Reliability Prediction of electronic Equipment " (MIL-HDBK-217F).

L'étude de l'indisponibilité du système composé des six (6) vannes d'injection d'hélium, qui fait partie du système simplifié d'arrêt d'urgence N°2, commence par la détermination des taux de défaillance dans les conditions hostiles pour les relais et les électrovannes, en utilisant les modèles cités plus hauts. Une évaluation de



l'indisponibilité du système des vannes dans les deux conditions (hostiles et normales) est obtenue. La variation des taux de défaillance des vannes dans les deux milieux a permis de distinguer un intervalle de taux de défaillance appelé (critique) où la différence entre l'indisponibilité du système dans les deux conditions est la plus sensible.

Une fois la plage ou l'intervalle des valeurs du taux de défaillance, qui donne le plus de variation entre les deux indisponibilités est déterminée, il reste à savoir quel composant (vanne, électrovanne ou relais) est le plus sensible ou le plus critique. En d'autres termes, il fallait répondre à la question suivante : quel est le composant qui contribue le plus à l'indisponibilité du système et dans quelle limite ? .

Pour répondre à cette question, on a regroupé les modes de défaillance des vannes et des électrovannes dans un seul mode de défaillance, le nouveau composant, avait pour nom "P<sub>V</sub>" et on a fait varier le taux de défaillance de ce dernier dans un intervalle de l'ordre de  $[2.71E-02, 1]$  pour plusieurs valeurs du taux de défaillance des relais, variant de  $\lambda_{RL} = 1E-05$  à  $\lambda_{RL} = 1E-01$ .

La figure 6.4 et le tableau 6.5, qui lui est associé montrent que l'indisponibilité du système commence à augmenter sensiblement avec l'augmentation du taux de défaillance des relais, elle devient significative à partir de  $\lambda_{RL} = 1E-02$  défaillances / année.

La figure 6.5 et le tableau 6.6, montrent la variation de l'indisponibilité du système en fonction de la variation pour les valeurs de  $\lambda_{RL}$ , suivantes :  $1E-02$ ,  $3.33 E-02$ ,  $6.66E-02$ ,  $1E-01$ .

On remarque bien que la variation de l'indisponibilité du système est liée étroitement aux taux de défaillance des relais, pour un taux de défaillance des relais assez bas, un taux de défaillance assez élevé des vannes ne provoque qu'une légère augmentation de l'indisponibilité du système. Et réciproquement, une légère

augmentation des taux de défaillance des relais provoque une augmentation sensible de l'indisponibilité du système, cela devient plus critique lorsqu'on dépasse la valeur de :  $\lambda_{RL} = 1E-02$  défaillances / année.

Ce résultat est en parfaite cohérence avec le design du relais qui, rappelons le n'est pas dans le même endroit que les vannes et les électrovannes, donc il n'est pas confronté aux mêmes conditions hostiles. Cela n'empêche en rien la certitude que le choix d'un relais d'une meilleure qualité contribuera d'une façon significative à l'augmentation de la disponibilité du système des vannes.

## BIBLIOGRAPHIE

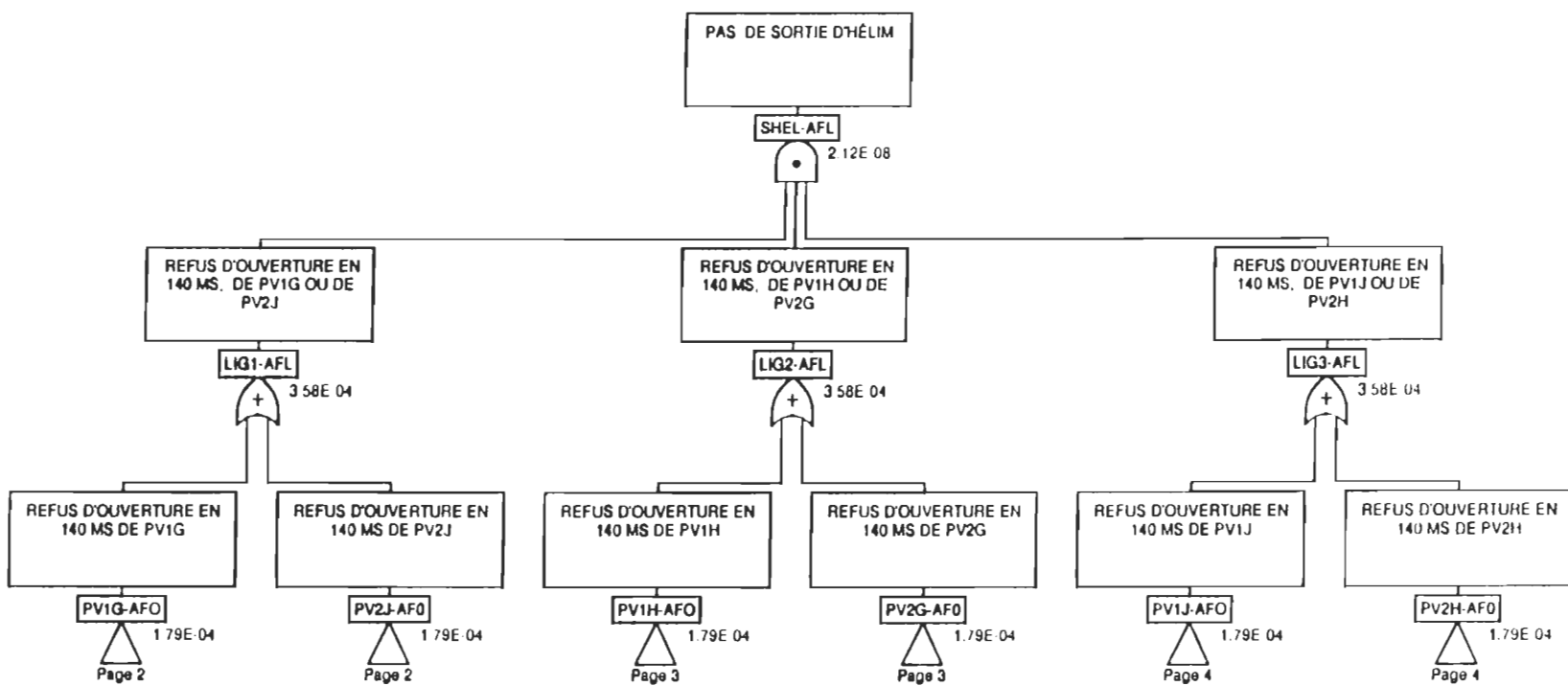
- [1] Titu, I. (1978). Initiation à la Fiabilité en électronique moderne . Paris : Édition masson.
- [2] Marcovici, C. & Ligeron, J. C. (1974). Techniques de fiabilité en mécanique : Edition Pic.
- [3] US. Department of Defense. Reliability Prediction of Electronic Equipment MIL-HDBK-217F, Notice1, 1990.
- [4] Operations Research Analysis Department, NSWC. (1994). Handbook of Reliability Procedures for mechanical equipment.
- [5] Mercier, J.-P. (1992). La maintenance des centrale nucléaires : Editions Kirk.
- [6] Ligeron, J.C. & Lyonnet, P. (1992). La fiabilité en exploitation : Organisation et traitement des données (2<sup>ième</sup> éd., (V.2)). Paris : Lavoisier Tech & Doc.
- [7] Pagès, A. et Gondran, M. (1980). Fiabilité des systèmes : Éditions Eyrolles.
- [8] Electric Power Research Institute & Sciences Applications International corporation. CAFTA for Windows-Fault Tree Analysis system version 3.2. User's manual, 1996.

- [9] U.S. Nuclear Regulatory Commission. Fault Tree Handbook. Rapport NUREG-0492, 1981.
- [10] Reliability Analysis Center. Nonelectronic Parts Reliability Data. NRPD-95, 1995
- [11] Alain, V., (1988). Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Paris : Eyrolles.
- [12] E.E.Lewis. (1987). Introduction to reliability engineering. USA : John Wiley&sons
- [13] P, Chapouille. R, Depazzis. (1968), Fiabilité des systèmes. Paris : Édition Masson et C<sup>ie</sup>.
- [14] David, K and Myron, L. (1962). Reliability: Management, Methods and Mathematics. USA : Prentice-Hall, Inc.
- [15] Egor, B. (1961) Reliability, theory and practice. USA : Prentice-Hall.
- [16] Young, D. & Christou, A. (1994). Failure- mechanism models for electromigration, IEEE Trans Reliability, vol. 43, pp 186- 191
- [17] Pecht, M., Nach, F.R., (1994). Predicting the Reliability of Electronic Equipment, Proceedings of the IEEE, vol. 82, juillet 1994.
- [18] Dimitri, K. (1991). Reliability engineering (v2.). USA : Simons & Schuster.

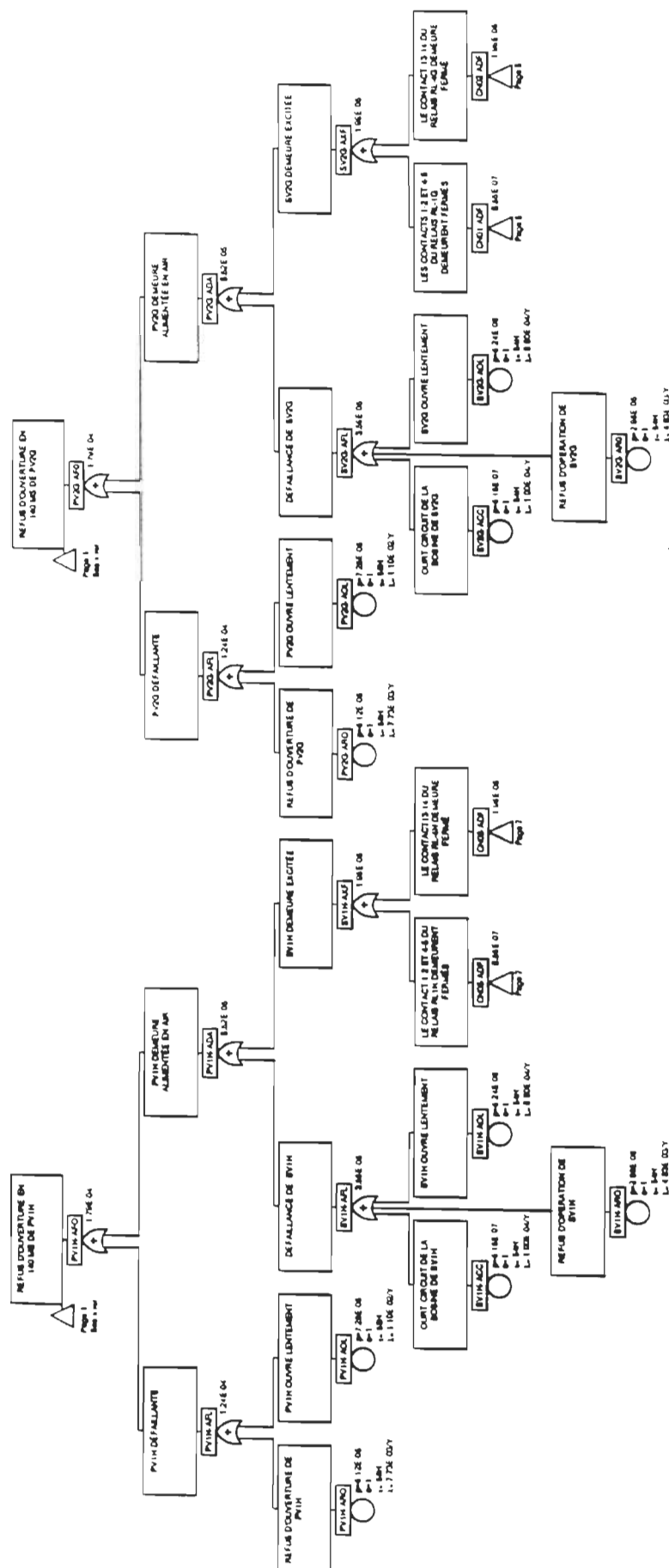
## **ANNEXE "A"**

**SAU#2-0**

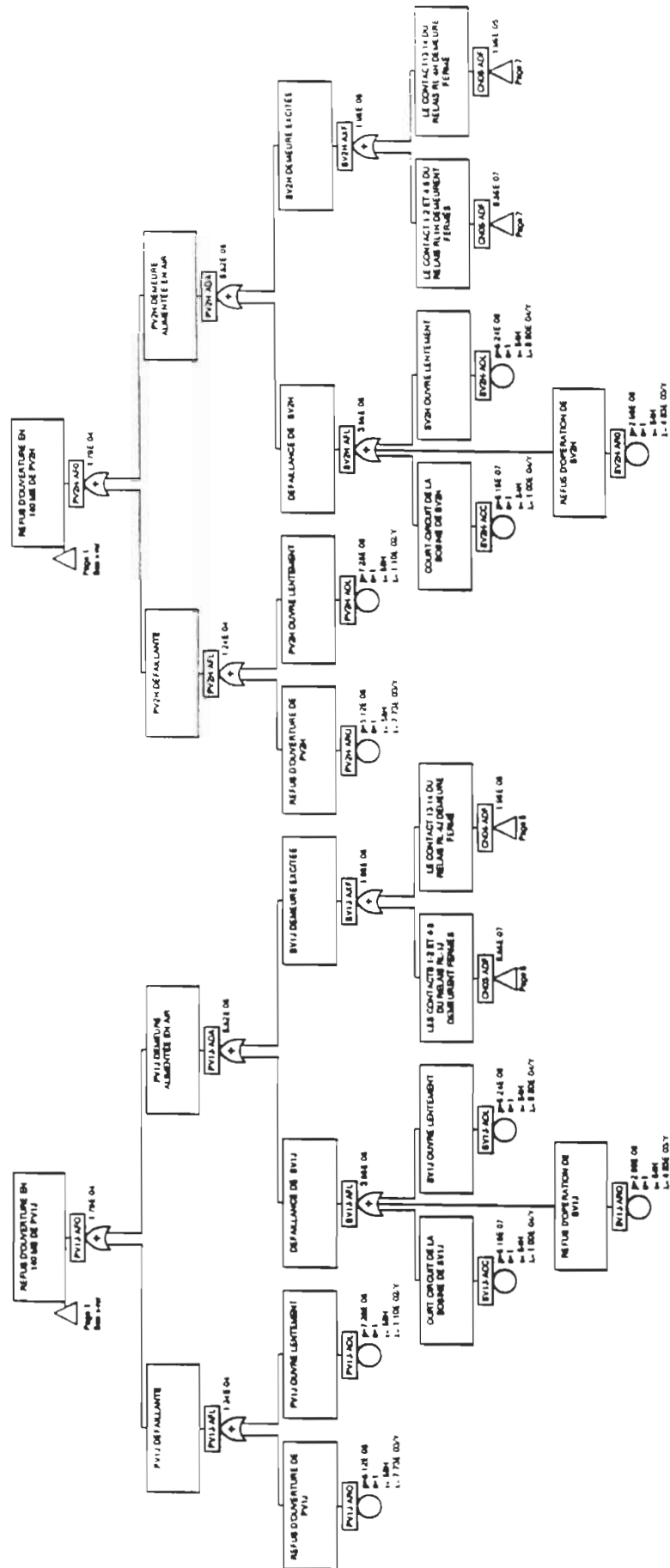
**Modèle et description**

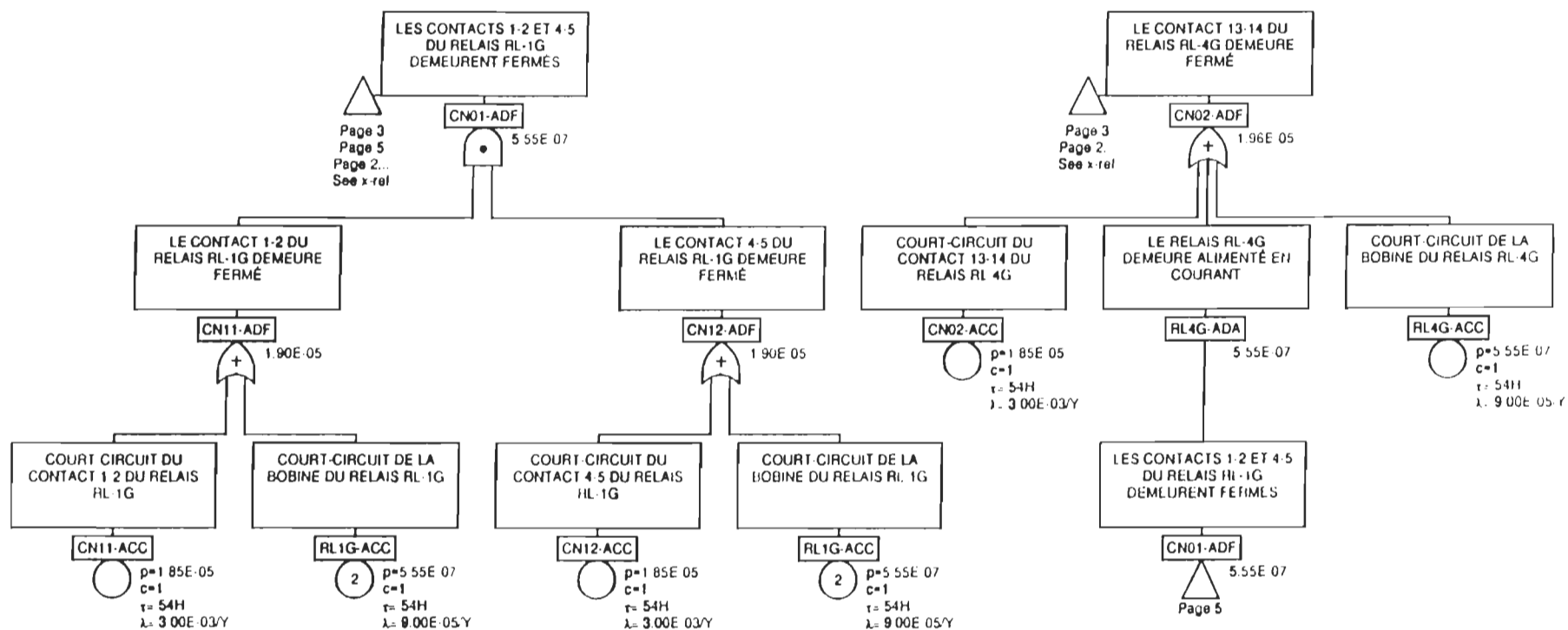


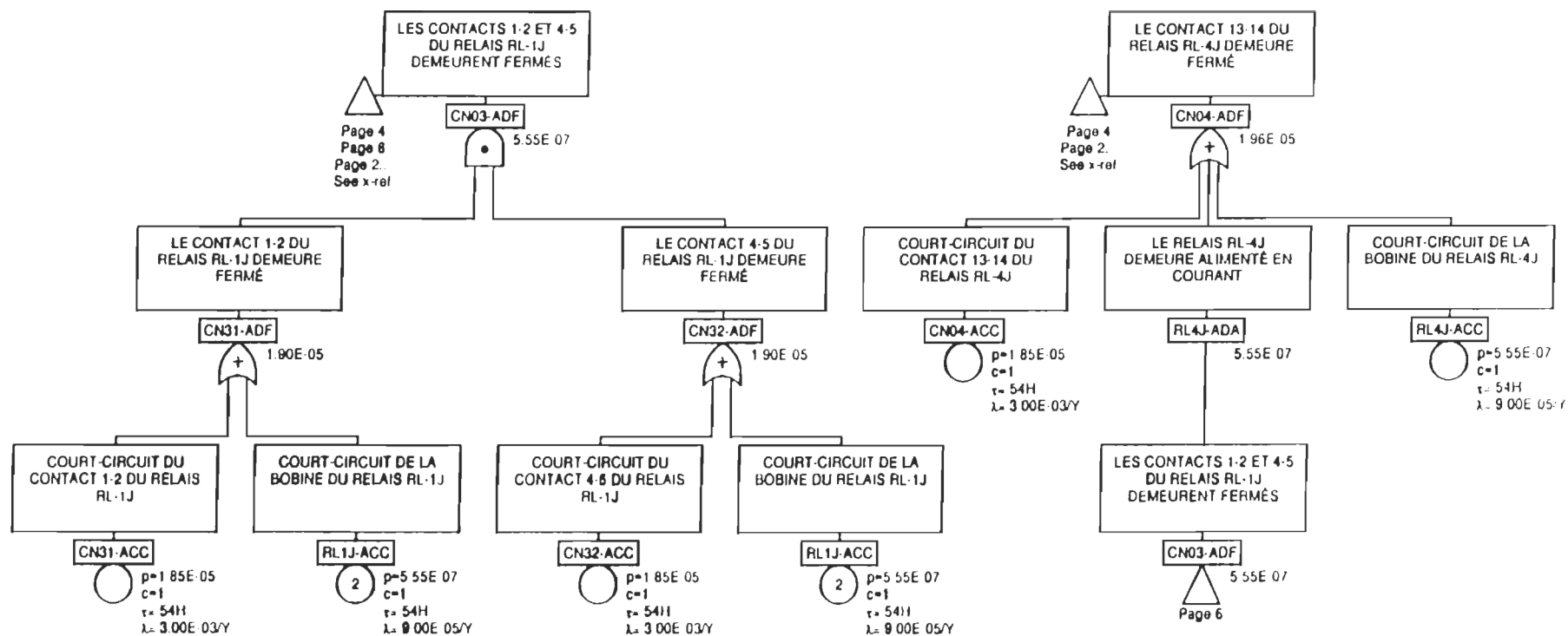


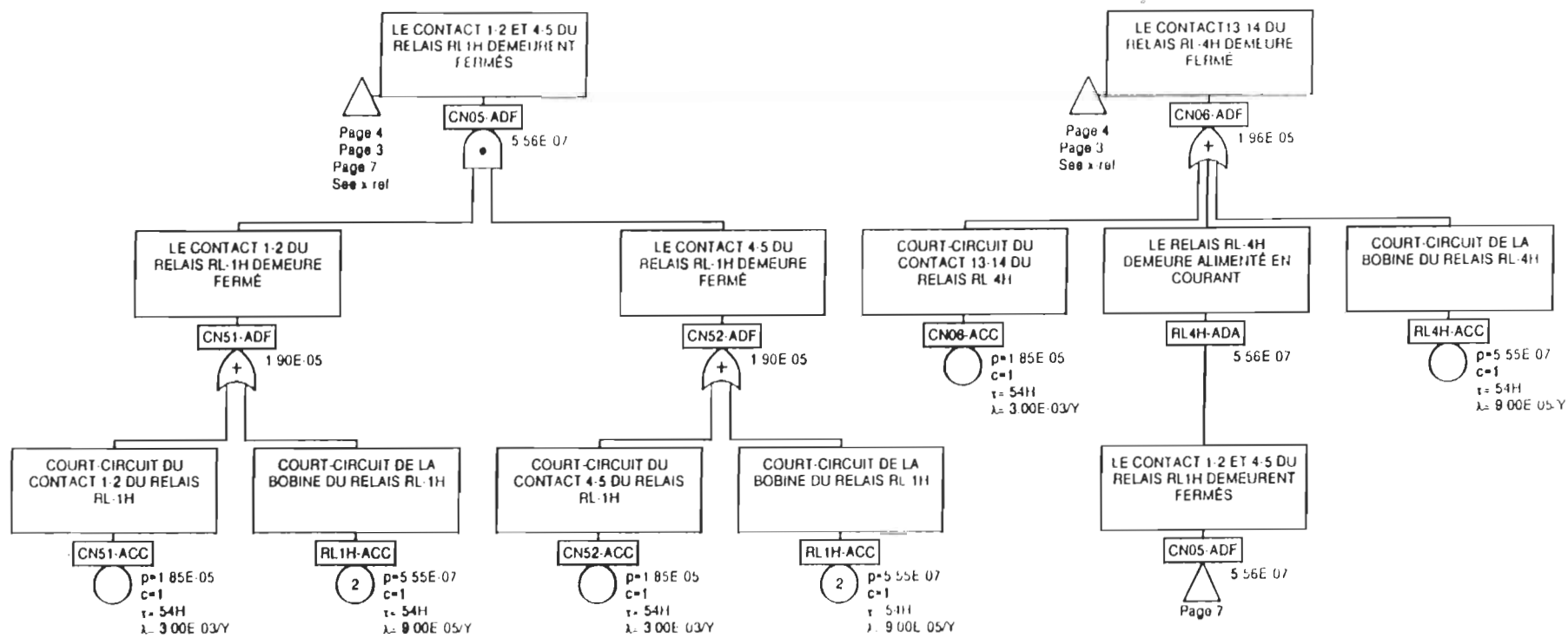












**TABLEAU A.1**  
Description des événements de base  
SAU#2.CAF

Nom d'événement de base	Probabilité	Description
CN02-ACC	1.85E-05	COURT-CIRCUIT DU CONTACT 13-14 DU RELAIS RL-4G
CN04-ACC	1.85E-05	COURT-CIRCUIT DU CONTACT 13-14 DU RELAIS RL-4J
CN06-ACC	1.85E-05	COURT-CIRCUIT DU CONTACT 13-14 DU RELAIS RL-4H
CN11-ACC	1.85E-05	COURT-CIRCUIT DU CONTACT 1-2 DU RELAIS RL-1G
CN12-ACC	1.85E-05	COURT-CIRCUIT DU CONTACT 4-5 DU RELAIS RL-1G
CN31-ACC	1.85E-05	COURT-CIRCUIT DU CONTACT 1-2 DU RELAIS RL-1J
CN32-ACC	1.85E-05	COURT-CIRCUIT DU CONTACT 4-5 DU RELAIS RL-1J
CN51-ACC	1.85E-05	COURT-CIRCUIT DU CONTACT 1-2 DU RELAIS RL-1H
CN52-ACC	1.85E-05	COURT-CIRCUIT DU CONTACT 4-5 DU RELAIS RL-1H
PV1G-AOL	7.28E-05	PV1G OUVRE LENTEMENT
PV1G-ARO	5.12E-05	REFUS D'OUVERTURE DE PV
PV1H-AOL	7.28E-05	PV1H OUVRE LENTEMENT
PV1H-ARO	5.12E-05	REFUS D'OUVERTURE DE PV1H
PV1J-AOL	7.28E-05	PV1J OUVRE LENTEMENT
PV1J-ARO	5.12E-05	REFUS D'OUVERTURE DE PV1J
PV2G-AOL	7.28E-05	PV2G OUVRE LENTEMENT
PV2G-ARO	5.12E-05	REFUS D'OUVERTURE DE PV2G
PV2H-AOL	7.28E-05	PV2H OUVRE LENTEMENT
PV2H-ARO	5.12E-05	REFUS D'OUVERTURE DE PV2H
PV2J-AOL	7.28E-05	PV2J OUVRE LENTEMENT
PV2J-ARO	5.12E-05	REFUS D'OUVERTURE DE PV2J
RL1G-ACC	5.55E-07	COURT-CIRCUIT DE LA BOBINE DU RELAIS RL-1G
RL1H-ACC	5.55E-07	COURT-CIRCUIT DE LA BOBINE DU RELAIS RL-1H
RL1J-ACC	5.55E-07	COURT-CIRCUIT DE LA BOBINE DU RELAIS RL-1J
RL4G-ACC	5.55E-07	COURT-CIRCUIT DE LA BOBINE DU RELAIS RL-4G

TABLEAU A.1 ( suite)

RL4H-ACC	5.55E-07	COURT-CIRCUIT DE LA BOBINE DU RELAIS RL-4H
RL4J-ACC	5.55E-07	COURT-CIRCUIT DE LA BOBINE DU RELAIS RL-4J
SV1G-ACC	6.16E-07	COURT-CIRCUIT DE LA BOBINE DE SV1G
SV1G-AOL	5.24E-06	SV1G OUVRE LENTEMENT
SV1G-ARO	2.98E-05	REFUS D'OPERATION DE SV1G
SV1H-ACC	6.16E-07	COURT-CIRCUIT DE LA BOBINE DE SV1H
SV1H-AOL	5.24E-06	SV1H OUVRE LENTEMENT
SV1H-ARO	2.98E-05	REFUS D'OPERATION DE SV1H
SV1J-ACC	6.16E-07	COURT-CIRCUIT DE LA BOBINE DE SV1J
SV1J-AOL	5.24E-06	SV1J OUVRE LENTEMENT
SV1J-ARO	2.98E-05	REFUS D'OPERATION DE SV1J
SV2G-ACC	6.16E-07	COURT-CIRCUIT DE LA BOBINE DE SV2G
SV2G-AOL	5.24E-06	SV2G OUVRE LENTEMENT
SV2G-ARO	2.98E-05	REFUS D'OPERATION DE SV2G
SV2H-ACC	6.16E-07	COURT-CIRCUIT DE LA BOBINE DE SV2H
SV2H-AOL	5.24E-06	SV2H OUVRE LENTEMENT
SV2H-ARO	2.98E-05	REFUS D'OPERATION DE SV2H
SV2J-ACC	6.16E-07	COURT-CIRCUIT DE LA BOBINE DE SV2J
SV2J-AOL	5.24E-06	SV2J OUVRE LENTEMENT
SV2J-ARO	2.98E-05	REFUS D'OPERATION DE SV2J

TABLEAU A.2

Coupes minimales (SAU#2)  
SHEL-AFL = 1.81E-08 ( Indisponibilité )

Indisponibilité	%	Entrées	
1.35E-09	7.4%	CN06-ACC	PV1G-AOL
1.35E-09	14.9%	CN04-ACC	PV2G-AOL
1.35E-09	22.3%	CN02-ACC	PV1J-AOL
1.35E-09	29.8%	CN04-ACC	PV1H-AOL
1.35E-09	37.2%	CN06-ACC	PV2J-AOL
1.35E-09	44.6%	CN02-ACC	PV2H-AOL
9.47E-10	49.9%	CN06-ACC	PV1G-ARO
9.47E-10	55.1%	CN04-ACC	PV1H-ARO
9.47E-10	60.3%	CN04-ACC	PV2G-ARO
9.47E-10	65.6%	CN02-ACC	PV1J-ARO
9.47E-10	70.8%	CN02-ACC	PV2H-ARO
9.47E-10	76.1%	CN06-ACC	PV2J-ARO

TABLEAU A.2 (suite)

5.51E-10	79.1%	CN02-ACC	SV1J-ARO
5.51E-10	82.1%	CN06-ACC	SV2J-ARO
5.51E-10	85.2%	CN04-ACC	SV2G-ARO
5.51E-10	88.2%	CN02-ACC	SV2H-ARO
5.51E-10	91.3%	CN06-ACC	SV1G-ARO
5.51E-10	94.3%	CN04-ACC	SV1H-ARO
3.42E-10	6.2%	CN04-ACC	CN06-ACC
3.42E-10	98.1%	CN02-ACC	CN06-ACC
3.42E-10	100.0%	CN02-ACC	CN04-ACC

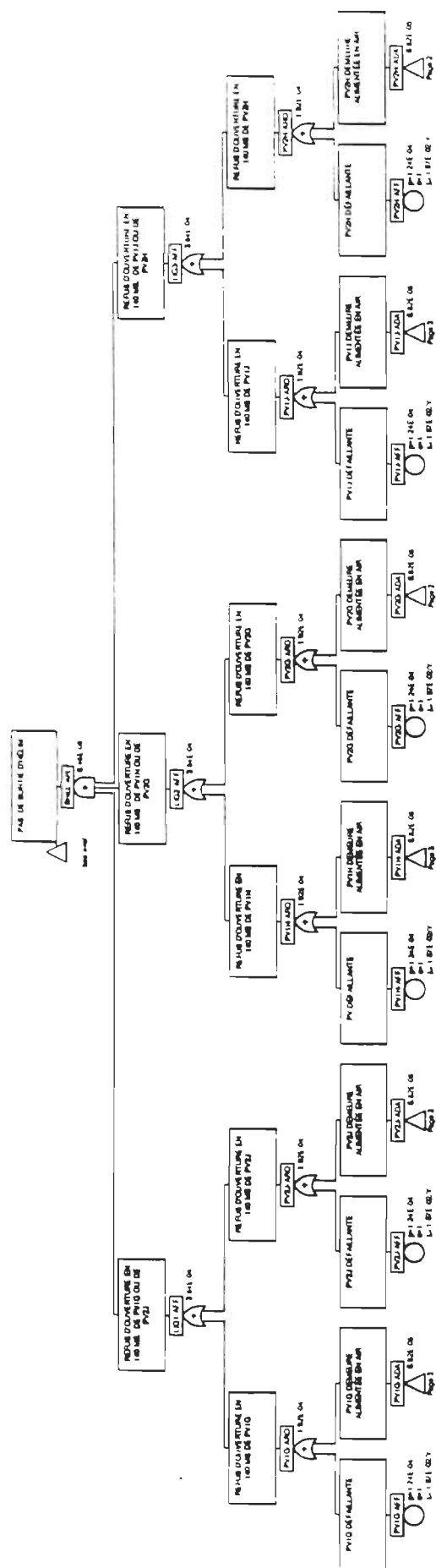
TABLEAU A.3  
Mesures d'importances

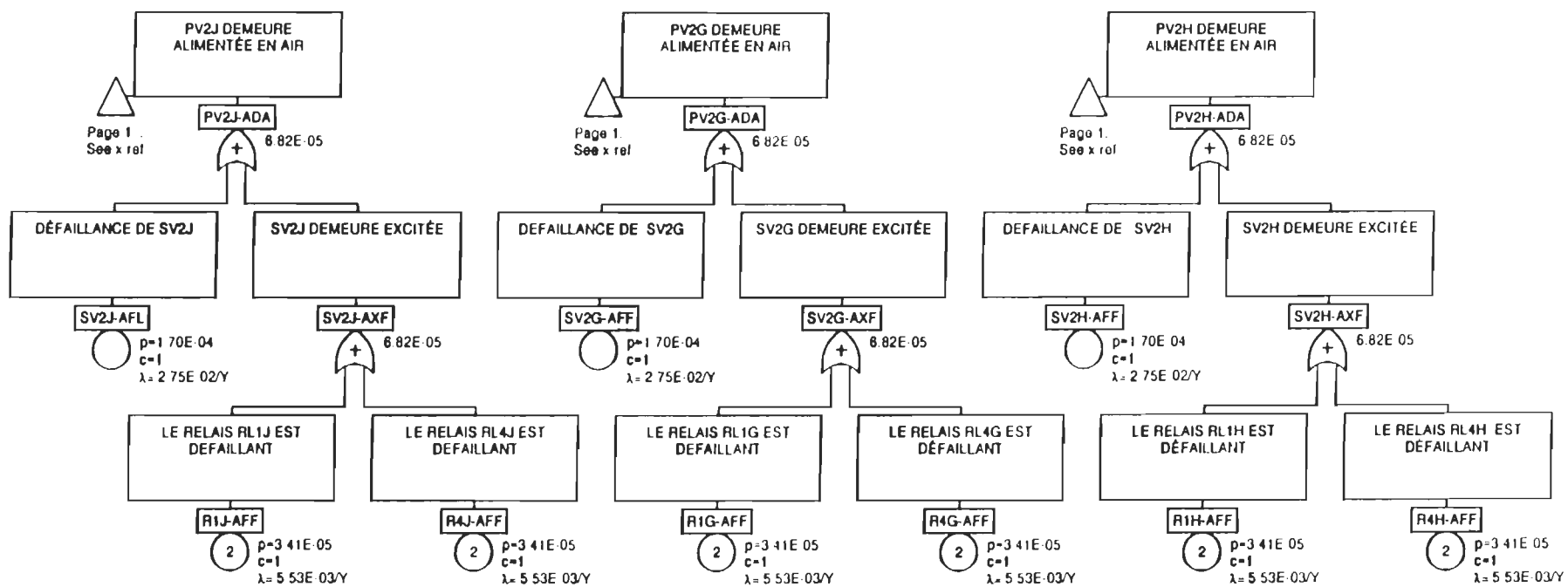
Nom d'événement	Probabilité	FV	BI	RRW	RAW W
CN02-ACC	1.85E-05	3.52E-01	3.45E-04	1.544	1.90E+04
CN04-ACC	1.85E-05	3.52E-01	3.45E-04	1.544	1.90E+04
CN06-ACC	1.85E-05	3.52E-01	3.45E-04	1.544	1.90E+04
PV1G-AOL	7.28E-05	7.44E-02	1.85E-05	1.080	1.02E+03
PV1H-AOL	7.28E-05	7.44E-02	1.85E-05	1.080	1.02E+03
PV1J-AOL	7.28E-05	7.44E-02	1.85E-05	1.080	1.02E+03
PV2G-AOL	7.28E-05	7.44E-02	1.85E-05	1.080	1.02E+03
PV2H-AOL	7.28E-05	7.44E-02	1.85E-05	1.080	1.02E+03
PV2J-AOL	7.28E-05	7.44E-02	1.85E-05	1.080	1.02E+03
PV1G-ARO	5.12E-05	5.23E-02	1.85E-05	1.055	1.02E+03
PV1H-ARO	5.12E-05	5.23E-02	1.85E-05	1.055	1.02E+03
PV1J-ARO	5.12E-05	5.23E-02	1.85E-05	1.055	1.02E+03
PV2G-ARO	5.12E-05	5.23E-02	1.85E-05	1.055	1.02E+03
PV2H-ARO	5.12E-05	5.23E-02	1.85E-05	1.055	1.02E+03
PV2J-ARO	5.12E-05	5.23E-02	1.85E-05	1.055	1.02E+03
SV1G-ARO	2.98E-05	3.05E-02	1.85E-05	1.031	1.02E+03
SV1H-ARO	2.98E-05	3.05E-02	1.85E-05	1.031	1.02E+03
SV1J-ARO	2.98E-05	3.05E-02	1.85E-05	1.031	1.02E+03
SV2G-ARO	2.98E-05	3.05E-02	1.85E-05	1.031	1.02E+03
SV2H-ARO	2.98E-05	3.05E-02	1.85E-05	1.031	1.02E+03
SV2J-ARO	2.98E-05	3.05E-02	1.85E-05	1.031	1.02E+03

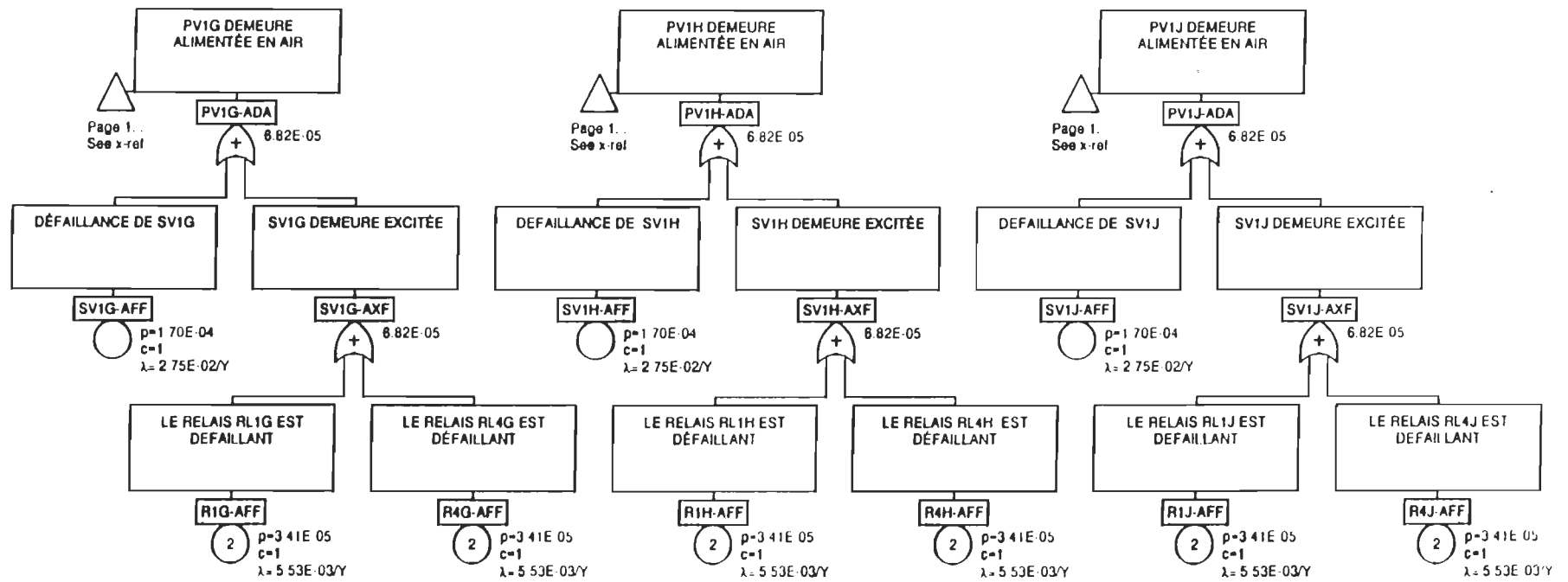
## **ANNEXE B**

### **Representation du modèle SAU#2-1**



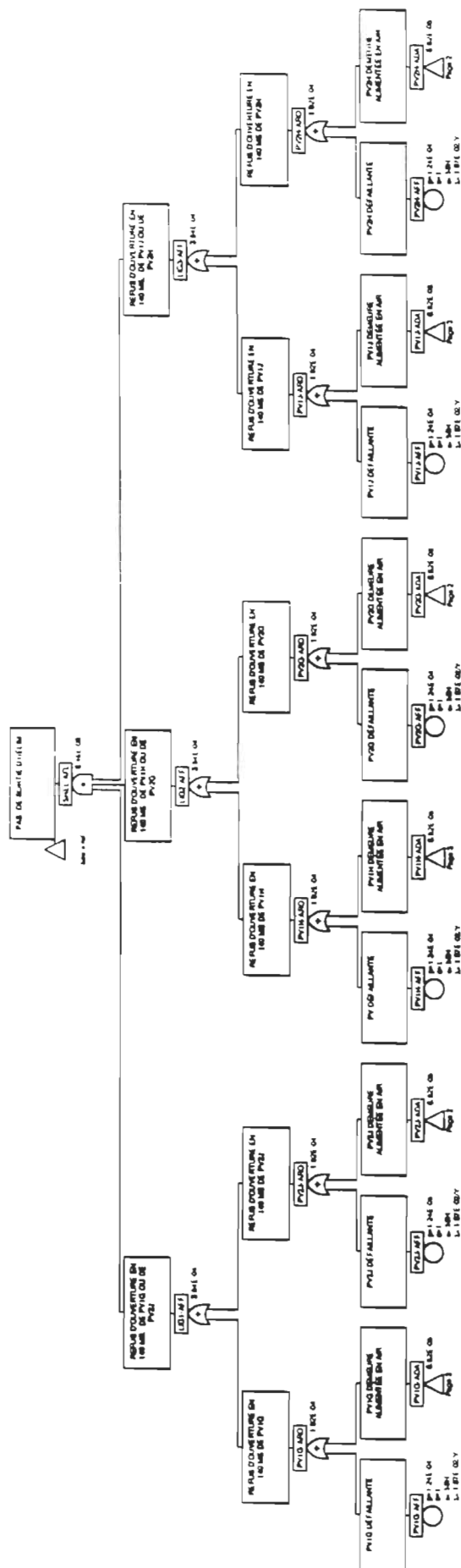


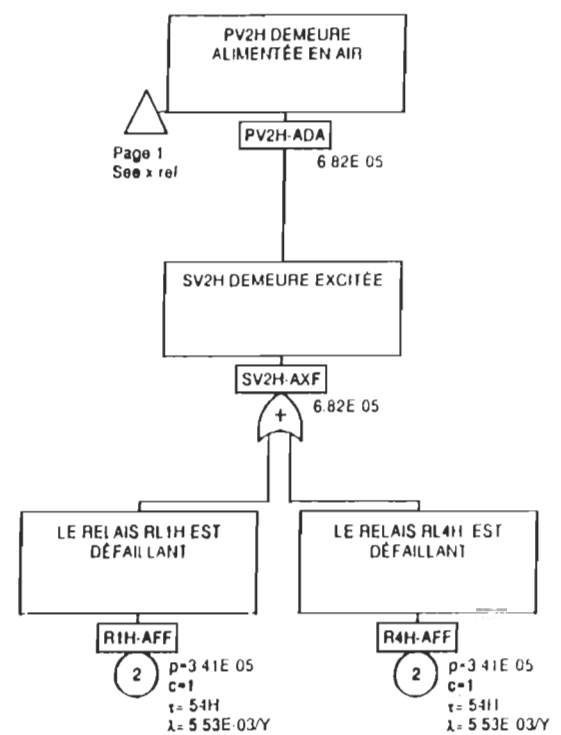
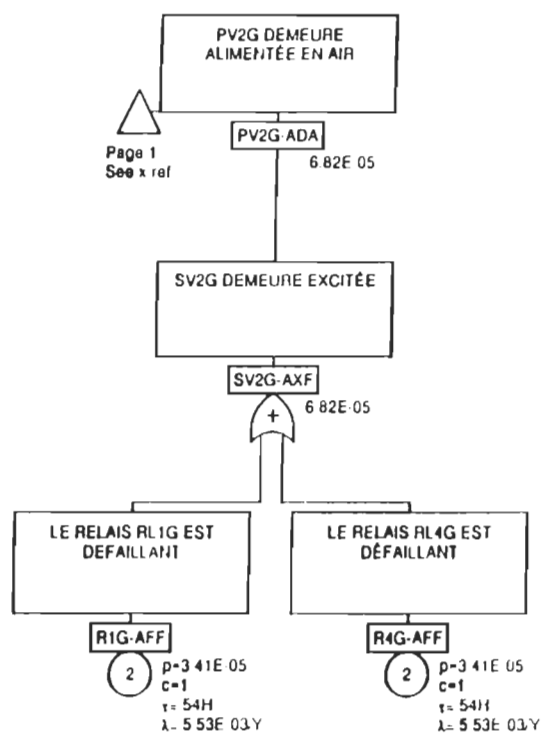
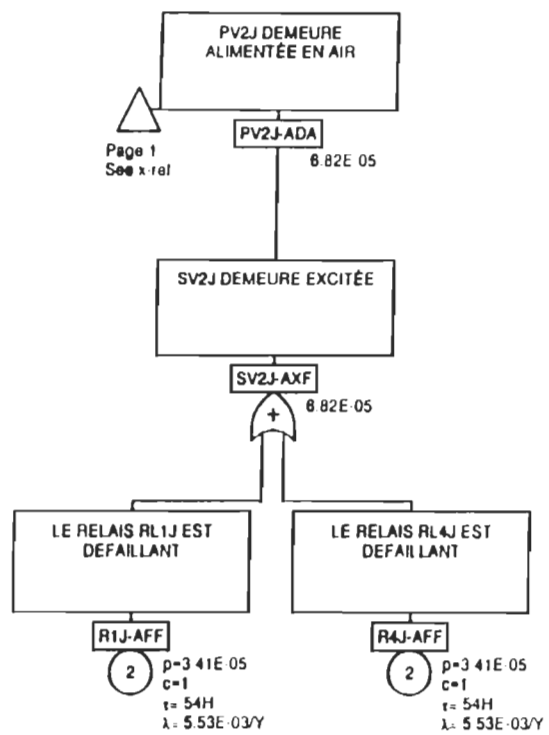


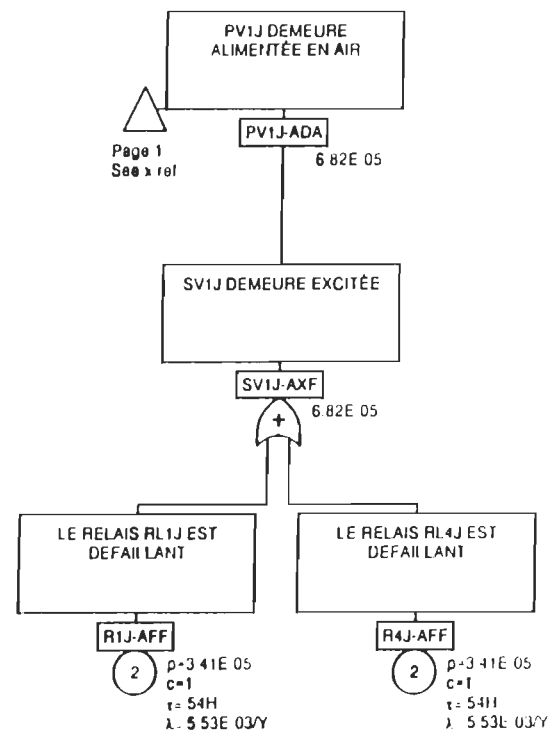
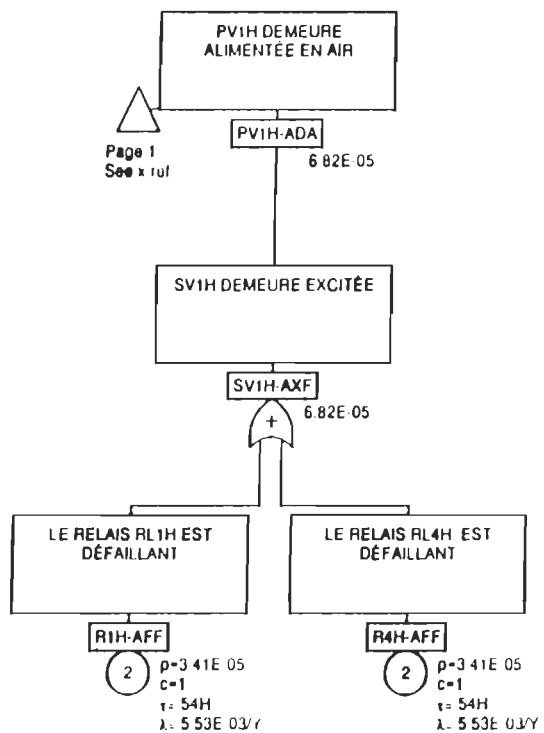
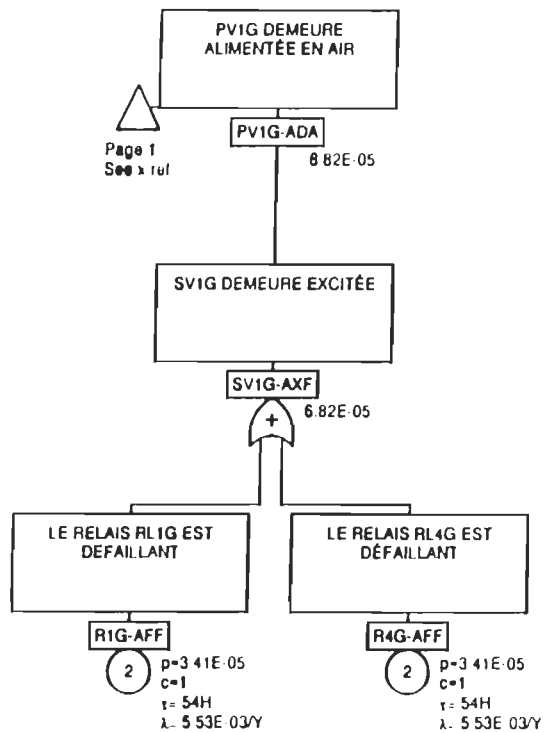


## **ANNEXE C**

### **Modèle SAU#2-2**







## **ANNEXE "D"**

**Description des défauts observés sur les vannes PV1G et 2G depuis  
avril 1995 et les corrections apportées.**



## D.1 INTRODUCTION

Cette annexe décrit les défauts sur les vannes d'injection de la chaîne G qui ont débuté en 1995, après le remplacement des électrovannes SV1G et SV2G par des vannes de rechange identiques, et les actions prises pour identifier et corriger la ou les causes. Ces électrovannes ont été remplacées pour corriger le taux de fuite sur la chaîne G qui était près de la limite acceptable. Cette intervention a eu lieu en avril 1995. À noter qu'il n'était pas évident de trouver immédiatement les causes qui entraînent les défauts survenus sur les vannes, sachant que les essais sur les vannes s'effectuent chaque semaine et que les défauts apparaissent dans un intervalle de 6 mois.

## D.2 HISTORIQUE ET DESCRIPTION DES DÉFAUTS

<b>Date</b>	Mai 1995.
<b>Défaut</b>	Augmentation du temps d'ouverture des vannes PVI G et 2G.
<b>Correctif</b>	Les électrovannes SVI G et SV2G ont été nettoyées et lubrifiées.
<b>Date</b>	Novembre et décembre 1995.
<b>Défaut</b>	Augmentation du temps d'ouverture de la vanne PVI G à trois reprises.
<b>Correctif</b>	Aux deux premières interventions l'électrovanne SVIG a été remplacée, à la troisième, la SVI G a été lubrifiée sans excédent de graisse et une procédure d'entretien a été écrite pour le reconditionnement de ces électrovannes.
<b>Date</b>	Mars 1996.
<b>Défaut</b>	Augmentation du temps d'ouverture de la vanne PVI G.
<b>Correctif</b>	Les électrovannes SVIG et SV2G ont été échangées l'une pour l'autre afin de déterminer si le défaut ne provenait pas d'une autre cause.
<b>Date</b>	Avril 1996.
<b>Défaut</b>	Augmentation du temps d'ouverture de la vanne PV2G confirmant que le défaut n'est pas situé sur la vanne PVI G.

**Correctif -** L'électrovanne maintenant appelée SV2G a été remplacée par une de rechange avec moins de graisse.

**Date** Août 1996.

**Défaut** Refus d'ouverture de la vanne PV2G.

**Correctif** L'électrovanne SV2G a été nettoyée et lubrifiée avec un autre type de graisse.

**Date** Avril 1997.

**Défaut** Refus de fermeture de la vanne PV2G à la suite de travaux d'entretien préventif sur les actionneurs des vannes PV1G et PV2G pour satisfaire la qualification environnementale.

**Correctif** L'électrovanne SV2G a été remplacée par une électrovanne de rechange lubrifiée avec le même type de graisse que l'intervention d'août 1996.

**Date** Novembre 1997.

**Défaut** Refus d'ouverture de la vanne PV2G lorsque l'électrovanne SV2G a coincé en position intermédiaire.

**Correctif** L'électrovanne SV2G a été remplacée par une électrovanne de rechange lubrifiée avec le même type de graisse que l'intervention d'août 1996. L'électrovanne retirée a été démontée et inspectée, aucun défaut mécanique n'a été observé.

**Date** Avril 1998.

**Défaut** Légère augmentation du temps d'ouverture de PV2G à 144 msec.

**Correctif** La vanne solénoïde SV2G a été remplacée par une électrovanne de rechange lubrifiée avec le même type de graisse que l'intervention d'août 1996. L'électrovanne retirée a été démontée et inspectée, aucun défaut mécanique n'a été observé.

<b>Date</b>	Mai 1998.
<b>Défaut</b>	Augmentation significative du temps d'ouverture de PV2G à 1.316 sec.
<b>Correctif</b>	Les deux vannes à décharger rapide ont été démontées et reconditionnées, on a noté un excédent de lubrifiant sur les membranes des vannes.
<b>Date</b>	Juin 1998.
<b>Défaut</b>	Augmentation significative du temps d'ouverture de PV2G à 0.460 sec.
<b>Correctif</b>	Les électrovannes SVLG et SV2G ont été échangées l'une pour l'autre afin de déterminer si le défaut ne provient pas d'une autre cause.
<b>Date</b>	Octobre 1998.
<b>Défaut</b>	Augmentation significative du temps d'ouverture de PVI G à 1.660 sec.
<b>Correctif</b>	L'électrovanne SVIG a été remplacée par une électrovanne de rechange provenant du magasin. L'électrovanne enlevée a été démontée et inspectée sans trouver de défaut, celle-ci a été retirée de la circulation. Le suivi de la PV2G montre que celle-ci a ralenti d'environ 20 msec depuis l'intervention de juin 1998.

## **ANNEXE "E"**

### **Description sommaire du logiciel CAFTA**

## Description sommaire du logiciel CAFTA

CAFTA pour Windows est un programme de développement d'arbre de défaillance qui fonctionne sous un environnement Microsoft Windows. Conçu par SAIC (Science Application International Corporation) pour EPRI (Electric Power Research Institut). CAFTA permet de :

1. construire un modèle d'arbre de défaillance
2. construire une base de donnée de fiabilité
3. évaluer l'arbre de défaillance afin d'obtenir des coupes minimales
4. réviser et analyser les résultats de coupes

CAFTA utilise les programmes de support suivants :

- CQUANT ou CUT386 ; programme pour déterminer les ensembles de coupes minimales d'un arbre de défaillance.
- SAILOT ou PLOT386 ; programme pour tracer les arbres de défaillances.
- GTPROB ; programme pour calculer la probabilité de chaque porte d'un arbre de défaillances.

La figure E.1 suivante présente les fonctions majeures de cafta lesquelles correspondent aux étapes d'une analyse d'arbre de défaillance

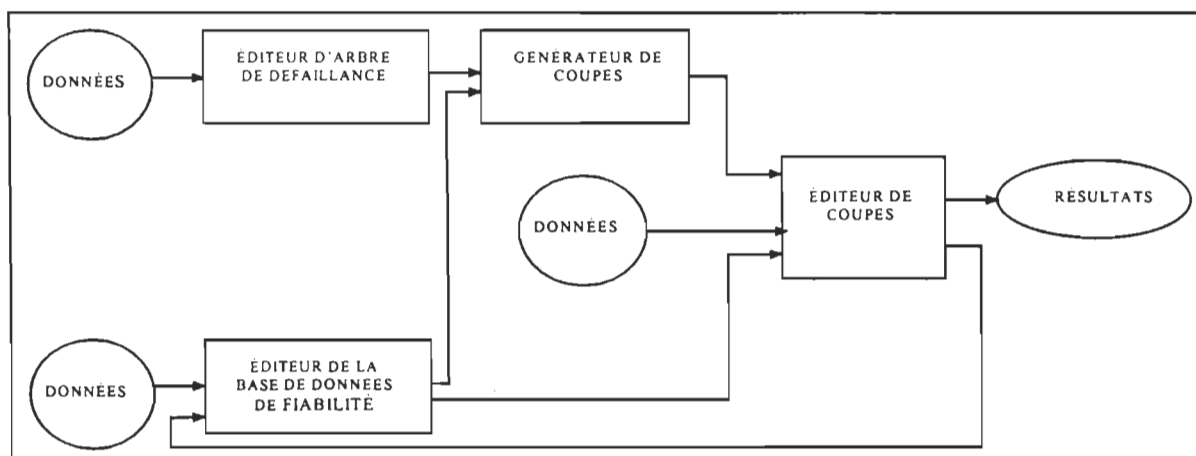


Figure E.1 : fonctions majeures de CAFTA

### Éditeur d'arbre de défaillance :

L'éditeur reconnaît la structure des modèles d'arbres de défaillances, la signification des types de portes, la différence entre les événements de base et les portes ainsi que les liens entre les événements de base et les portes et entre les portes. Ces capacités permettent à l'éditeur de vérifier le modèle au fur et à mesure qu'il est construit. En plus, l'éditeur d'arbre de défaillance supporte plusieurs fonctions spécialisées d'édition (ex : porte VRAI ou FAUX). L'éditeur procure aussi un lien avec la base de données, permettant à l'utilisateur d'introduire les données descriptives et de fiabilité pendant qu'il construit le modèle.

### Base de données de fiabilité :

CAFTA pour Windows est composé de trois bases de données :

- BE : Basic event database- base de données des événements de base, contient le nom ou le code d'identification de l'événement de base, son temps de mission ou de restauration ainsi que sa description. Elle est interalliée à la base des taux de défaillances par son code d'identification.
- TC: Failure rate database, base de données des taux de défaillance, contient les codes des composants et de leurs modes de défaillances ainsi que les taux de défaillance qui y sont associés.
- GT: Gate description data, base des portes, elle contient les informations sur les portes de sorties, incluant les descriptions et références. Cette base de données ne contient aucune donnée de fiabilité, seulement des informations décrivant le modèle d'arbre de défaillance.

**Tableau E.1 Événements primaires utilisés par CAFTA**

Événement	Code
de base	B
certain	H
non-développé	U
externe	D
conditionnel	C

**Tableau E.2 Portes logiques utilisées par CAFTA**

Porte	Code	Fonction booléenne	Limite
ET	AND	$g = a * b * c$	2 à n
OU	OR	$g = a + b + c$	2 à n
NOT	NOT	$g = a$	1
Équivalente	EQU	$g = a$	1
	NOR	$g = \overline{a * b} = \overline{a + b}$	2
	NANB	$g = \overline{a + b} = \overline{a * b}$	2
	AANB (ANOT)	$g = a * \overline{b}$	2
	ANAB	$g = \overline{a} + b$	2
	OANB(ANOT)	$g = a + \overline{b}$	2
	ONAB	$g = \overline{a} + b$	2
OU exclusive	XOR	$g = \overline{a} * b + a * \overline{b}$	2
m/n	COMm	$g = a * b + a * c + b * c$	3 à n, m < n
ET conditionnel	INH	$g = a * b$	2

**Tableau E.3 Événements primaires utilisés par CAFTA**

Événement	Code
de base	B
certain	H
non-développé	U
externe	D
conditionnel	C

**Tableau E.4 Codes de transfert utilisés par CAFTA**

Événement	Code
transfert	T
transfert spécial	S

**Tableau E.5 Modes de calcul de la probabilité des événements primaires**

$C = 0$	$P$	Probabilité inscrite directement au logiciel
$C = 1$	$\lambda\tau$	Pour non-fiabilité ou indisponibilité
$C = 2$	$\lambda\tau/2$	Pour composant dormant
$C = 3$	$1 - e^{-\lambda\tau}$	Non-fiabilité

**Tableau E.6 Unité de temps disponible**

Temps	Code
Heures	H
Jour	D
Mois	M
Quart	Q
Année	Y
Sur demande	N